

ผลของรูปร่างทางเข้าต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศ-น้ำ

ที่ไหลในไมโครแชนเนล

Effects of Inlet Geometry on Heat Transfer Performance

of Air-Water Flow in Microchannels



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effects of Inlet Geometry on Heat Transfer Performance
of Air-Water Flow in Microchannels

Bodeetham Thamsuthon

Sirachat Nipatkusolkrit

Jaipitchaya Suteerapongpun

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของรูปร่างทางเข้าต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศ-น้ำที่ไหลในไมโครแชนเนล

นายบตีธรรม ธรรมสุธน 62010503

นายศิริชัย นิพัทธ์กุลศลกิจ 62010863

นางสาวใจพิชญา สุธีรพงศ์พันธ์ 62011310

ผศ.ดร.มธุรส สุชาติวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

เอกสารฉบับนี้นำเสนอการวิจัยในรูปแบบการทดลองการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคลื่นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงรูปแบบทางเข้าของไมโครแชนเนลให้ของไหลทั้งสองสถานะสามารถไหลได้ครบทุกช่อง และของไหลสองสถานะผสมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นก่อนเข้าสู่ไมโครแชนเนล โดยไมโครแชนเนลรูปคลื่นมีจำนวน 25 ช่อง ช่องทางการไหลมีความกว้าง 0.8 มิลลิเมตร ความสูง 0.5 มิลลิเมตร ความยาว 40 มิลลิเมตร และแอมพลิจูด 0.62 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเก็บรูปภาพการไหลที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปสร้างแผนที่รูปแบบการไหลของไมโครแชนเนลรูปคลื่นและเปรียบเทียบสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นในรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ : ไมโครแชนเนลรูปคลื่น, รูปแบบการไหล, การไหลสองสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effects of inlet geometry on heat transfer performance of air-water flow in microchannels

Bodeetham Thamsuthon 62010503

Sirachat Nipatkusolkrit 62010863

Jaipitchaya Suteerapongpun 62011310

Asst. Prof. Dr. Maturase Suchatawat Advisor

Year 2022

ABSTRACT

This paper presents an experiment of air-water two-phase flow in wavy microchannels. The experimental purpose is to improve the inlet geometry of wavy microchannels so that both the water and gas phases can well mix and flow through all channels of the wavy microchannels. The microchannels include 25 channels, the channel is 0.8 mm wide, 0.5 mm high, 40 mm long, and have an amplitude of the wave shape of 0.62 mm. Photos of the flow patterns at different flow rates are taken and a flow pattern map is generated. Heat transfer performance for different flow patterns is also studied.

Keywords : Wavy microchannels, Flow pattern , Two-phase flow

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาที่เคารพรัก ผศ.ดร.มธุรส สุชาตะวัฒน์ ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือตลอดการทำปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้อบรมสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ จนสามารถประสบความสำเร็จกับโครงการนี้



บติธรรม	ธรรมสุธน
ศิริชัย	นิพัทธ์กุลกลกิจ
ใจพิชญญา	สุธีรพงศ์พันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 สมมติฐาน.....	3
1.4 ขอบเขตการดำเนินการ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 การไหลของของไหลในไมโครแชนเนล.....	4
2.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลในไมโครแชนเนล.....	11
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
3.1 การไหลของของไหลสองสถานะในไมโครแชนเนล.....	14
3.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของเหลว (Superficial liquid Reynolds number).....	14
3.1.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของก๊าซ (Superficial gas Reynolds number).....	15
3.1.3 ตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะ.....	15
3.2 รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะที่ไหลในไมโครแชนเนล.....	16
3.3 การถ่ายเทความร้อน.....	17
3.3.1 ค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number).....	17
3.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	17
3.3.3 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีป (η_f).....	18
3.4 การทำนายตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะ.....	21
3.4.1 ตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อตรง.....	21
3.4.2 ตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อกว้าง.....	22
3.4.2 ตัวเลขดีน (Dean number).....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number).....	22
3.5 สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance index).....	23
3.6 ความดันลดในช่องทางการไหลแบบสองสถานะ	23
3.6.1 ความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทาน	24
3.6.2 ความดันลดเนื่องจากความเร่ง.....	24
3.6.3 ความดันลดที่เกิดจากการหดตัวของของไหลที่ทางออก	24
3.6.4 ความดันลดที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลที่ทางเข้า	25
บทที่ 4 การออกแบบชุดทดลอง.....	26
4.1 การทำงานและรายละเอียดของชุดทดลอง	26
4.1.1 คุณสมบัติของไมโครเซนเซอร์คลีน	26
4.1.2 แผนผังการทำงานของชุดทดลอง.....	27
4.2 ขั้นตอนการสำรวจส่วนประกอบของชุดทดลองและปรับปรุงชุดทดลอง	28
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	28
4.4 การทดสอบและอ่านค่าจากชุดทดลองเดิม	33
4.5 สร้างต้นแบบชุดทดลองใหม่	34
4.6 รายละเอียดต้นแบบชุดทดลองใหม่	35
4.7 สร้างชุดทดลองเพื่อนำมาใช้จริง	35
4.8 รายละเอียดของชุดทดลองใหม่	36
4.9 ค่าที่ใช้ในการทดลอง.....	38
4.9.1 การทดลองรูปแบบการไหล	38
4.9.2 การทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	38
4.10 ขั้นตอนการทดลอง	39
บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผล	40
5.1 การกระจายตัวของการไหลในสองสถานะของชุดทดลองเดิม	40
5.2 การกระจายตัวของการไหลในสองสถานะของชุดทดลองใหม่	42
5.3 ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง	46
5.3.1 การตรวจสอบการไหลของของไหลสองสถานะการตรวจสอบในไมโครเซนเซอร์คลีน.....	46
5.4 รูปแบบการไหล.....	48
5.5 การถ่ายเทความร้อนและความดันลดของการไหลแบบสองสถานะ	51
5.6 สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance Index, PI)	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	55
6.1	สรุปผลการทดลอง	55
6.2	ข้อเสนอแนะ	56
บรรณานุกรม	57
ภาคผนวก ก	การคำนวณหาประสิทธิภาพของครีบและเลขนัทเชิลท์	61
ภาคผนวก ข	การคำนวณหาแฟกเตอร์ความเสียหาย	63
ภาคผนวก ค	การคำนวณหาขนาดของปั้มน้ำ	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบการไหล.....	38
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1 รูปแบบการไหลในแนวนอน [2].....	2
ภาพที่ 1.2 รูปแบบการไหลในแนวตั้ง [3].....	2
ภาพที่ 2.1 แบบจำลองไมโครแซนเนลแบบ I-type และ U-type [7].....	5
ภาพที่ 2.2 แบบจำลองแสดงรูปแบบการไหลต่างๆที่ค่าอัตราการไหลต่างกัน [11].....	6
ภาพที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และ Re ในไมโครมิกเซอร์ทั่วไป [11].....	7
ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และ Re ใน CSCR ไมโครมิกเซอร์ [12].....	7
ภาพที่ 2.5 แผนภาพทางเข้าที่ถูกตัดแปลงภาพที่และเส้นการไหลผ่านทางเข้าที่ถูกตัดแปลง [13].....	8
ภาพที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ของ MF และ V_{in} เมื่อเปรียบเทียบระหว่างทางเข้ารูปแบบต่างๆ [13]	9
ภาพที่ 2.7 แผนที่รูปแบบการไหลเมื่อท่อกระจายของไหลมีความเอียง 0 องศา.....	9
ภาพที่ 2.8 แผนที่รูปแบบการไหลเมื่อท่อกระจายของไหลมีความเอียง 90 องศา.....	10
ภาพที่ 2.9 แสดงรูปร่างของจำนวนทางเข้าจำกัดรูปแบบต่างๆ (a) ไม่มีทางเข้าจำกัดช่องทางการไหล (b) ทางเข้าจำกัด 1 ช่อง (c) ช่องทางจำกัด 3 ช่อง (d) ช่องทางจำกัด 5 ช่อง [15].....	11
ภาพที่ 2.10 มุมมองจากด้านบนของไมโครแซนเนลรูปแบบต่างๆ [19].....	12
ภาพที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_{avg} และ Re [19]	13
ภาพที่ 3.1 รูปแบบการไหลในไมโครแซนเนล.....	16
ภาพที่ 3.2 แผนภาพแสดงวิธีการคำนวณตัวเลขนิตเชิลท์	19
ภาพที่ 3.3 แผนภาพแสดงวิธีการคำนวณแฟกเตอร์ความเสียดทาน	20
ภาพที่ 3.4 แสดงรัศมีความโค้งของท่อรูปคลื่น.....	22
ภาพที่ 4.1 พารามิเตอร์ของไมโครแซนเนลเมื่อมองจากด้านบน.....	26
ภาพที่ 4.2 พารามิเตอร์ของไมโครแซนเนลเมื่อมองจากด้านหน้า.....	27
ภาพที่ 4.3 แผนผังการทำงานของชุดทดลอง.....	27
ภาพที่ 4.4 ยิงซิลิโคนยึดติดกับถังอะคริลิก.....	28
ภาพที่ 4.5 ถังอะคริลิก.....	28
ภาพที่ 4.6 ป้อนน้ำ.....	29
ภาพที่ 4.7 ป้อนลม.....	29
ภาพที่ 4.8 ตัวควบคุมความดัน.....	29
ภาพที่ 4.9 โรตารีเตอร์.....	30
ภาพที่ 4.10 ฮีตเตอร์.....	30
ภาพที่ 4.11 เทอร์โมคัปเปิล (a) ชนิด T (b) ชนิด J.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.12 อุปกรณ์จ่ายไฟ.....	31
ภาพที่ 4.13 เซ็นเซอร์ความดัน.....	31
ภาพที่ 4.14 คาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ (a) ทาซิลิโคนนำความร้อน (b) ไม่ทาซิลิโคนนำความร้อน.....	31
ภาพที่ 4.15 เครื่องวัดและบันทึกสัญญาณ.....	32
ภาพที่ 4.16 กล้องถ่ายรูป Olympus e-m10 mark III.....	32
ภาพที่ 4.17 ขาตั้งกล้อง.....	32
ภาพที่ 4.18 การติดตั้งกล้องสำหรับถ่ายภาพการไหล.....	33
ภาพที่ 4.19 ตัวอย่างภาพลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นรูป.....	34
ภาพที่ 4.20 โมเดลต้นแบบจากเครื่องปรีน 3 มิติ.....	34
ภาพที่ 4.21 ต้นแบบชุดทดลองปรับปรุงใหม่ที่สร้างในโปรแกรม AutoCAD.....	354
ภาพที่ 4.22 ภาพขณะทำการหล่อเรซิน.....	35
ภาพที่ 4.23 ภาพขณะทำการทดสอบชุดทดลอง.....	36
ภาพที่ 4.24 รายละเอียดของชุดทดลองใหม่.....	37
ภาพที่ 5.1 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	40
ภาพที่ 5.2 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	41
ภาพที่ 5.3 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	41
ภาพที่ 5.4 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	42
ภาพที่ 5.5 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	42
ภาพที่ 5.6 ภาพแสดงการกระจายการไหลในไมโครแชนเนล.....	43
ภาพที่ 5.7 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	43
ภาพที่ 5.8 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	44
ภาพที่ 5.9 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	44
ภาพที่ 5.10 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	45
ภาพที่ 5.11 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราการไหลของอากาศ 1 LPM.....	47
ภาพที่ 5.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของของไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb และ Sheader [26].....	48
ภาพที่ 5.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของของไหลสองสถานะในท่อตรงที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Chuanshuai Dong และ Takashi Hibiki [24].....	49
ภาพที่ 5.14 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของสองสถานะในไมโครแชนเนล.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 5.15 รูปแสดงตัวอย่างการไหลแบบ Slug flow ที่ $J_{SL} = 0.17$ และ $J_{SG} = 0.66$	50
ภาพที่ 5.16 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างการไหลแบบ Churn flow ที่ $J_{SL} = 0.33$ และ $J_{SG} = 0.80$	50
ภาพที่ 5.17 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างการไหลแบบ Annular flow ที่ $J_{SL} = 0.23$ และ $J_{SG} = 1.99$...	51
ภาพที่ 5.18 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างการไหลแบบ Bubbly flow ที่ $J_{SL} = 0.3$ และ $J_{SG} = 0.27$	51
ภาพที่ 5.19 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในไมโครแชนเนลคี่น.....	52
ภาพที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าแฟกเตอร์ความเสียหายกับตัวเลขเรย์โนลของการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคี่น	52
ภาพที่ 5.21 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อตรง.....	53
ภาพที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าแฟกเตอร์ความเสียหายกับตัวเลขเรย์โนลของการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปตรง	53
ภาพที่ 5.23 กราฟแสดงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน	54

รายการสัญลักษณ์

A	คือ พื้นที่ (m^2)
C_c	คือ สัมประสิทธิ์การหดตัว
c_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot k$)
D_h	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)
De	คือ ตัวเลขดึน
f_{TP}	คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
G	คือ ฟลักซ์มวล ($kg/m \cdot s$)
h	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot k$)
H_f	คือ ความสูงของครีป (m)
J	คือ ความเร็วผิวของไหล (m)
k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot k$)
L	คือ ความยาวของท่อ (m)
\dot{m}	คือ อัตราไหลเชิงมวล (kg/s)
N	คือ จำนวนไมโครแซนเนล
Nu	คือ ตัวเลขนัสเซลท์
P	คือ ปริมาณพลเปียกหรือเส้นรอบรูปเปียกของหน้าตัดท่อ (m)
PI	คือ สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน
Pr	คือ ตัวเลขพรันด์เทิล
Q	คือ ปริมาณความร้อน (W)
Re	คือ ตัวเลขเรย์โนลด์
R_c	คือ รัศมีความโค้ง (m)
S_c	คือ ความกว้างของไมโครแซนเนล (m)
S_f	คือ ความกว้างของครีป (m)
T	คือ อุณหภูมิ (k)
V	คือ ความเร็ว (m/s)
X	คือ ตัวแปรไร้มิติของ Lockhart–Martinelli
x	คือ คุณภาพไอ
Y	คือ แอมพลิจูด (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อักษรกรีก

λ	คือ ความยาวคลื่น (m)
ρ	คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)
μ	คือ ความหนืด ($\text{kg/m} \cdot \text{s}$)
α	คือ สัดส่วนช่องว่าง
γ	คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อที่เชื่อมต่อกับท่อ

อักษรห้อย

<i>cb</i>	คือ พื้นที่ด้านล่างแต่ละช่องของไมโครแชนเนล
<i>cs</i>	คือ พื้นที่ด้านข้างแต่ละช่องของไมโครแชนเนล
<i>G</i>	คือ แก๊ส
<i>in</i>	คือ ทางเข้า
<i>L</i>	คือ ของเหลว
<i>m</i>	คือ เฉลี่ย
<i>out</i>	คือ ทางออก
<i>SG</i>	คือ ที่ผิวของแก๊ส
<i>SL</i>	คือ ที่ผิวของเหลว
<i>TP</i>	คือ สองสถานะ
$1\emptyset$	คือ ของไหลสถานะเดียว
$2\emptyset$	คือ ของไหลสองสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

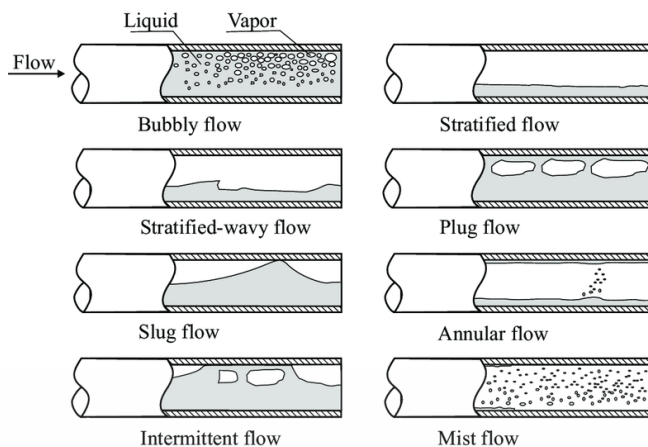
บทที่ 1

บทนำ

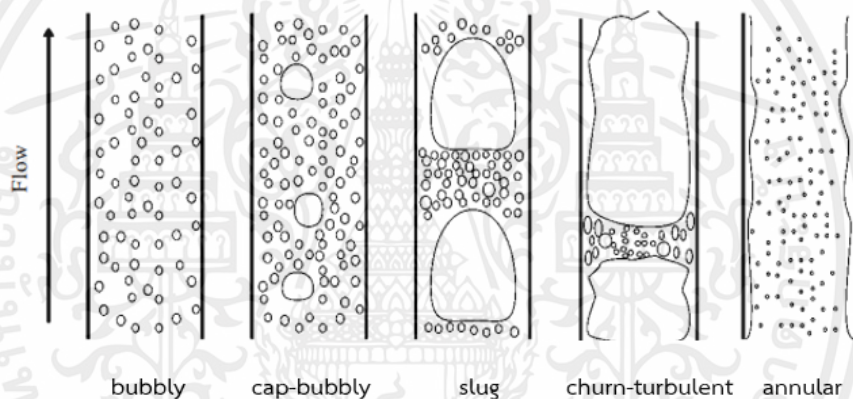
1.1 ที่มาและความสำคัญ

แนวโน้มของเทคโนโลยีในปัจจุบันเป็นการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีส่วนประกอบเป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กจำนวนมากซึ่งนำไปสู่ความต้องการในการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในส่วนประกอบดังกล่าวเพื่อคงประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเครื่องมือโดยทางเลือกในการถ่ายเทความร้อนมีหลายวิธี โดยการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบช่องขนาดเล็กหรือเรียกว่าไมโครแชนเนลเป็นทางหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงและจากผลการวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าเมื่อของไหลทำความเย็นไหลผ่านไมโครแชนเนลรูปคลื่นจะเกิดการไหลแบบทุติยภูมิซึ่งเกิดกระแสน้ำวนไหลในทิศตรงข้ามกัน (Dean vortices) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของไมโครแชนเนลรูปคลื่นดีกว่าไมโครแชนเนลที่เป็นการไหลรูปตรง โดยค่าแรงดันตกที่เกิดขึ้นในไมโครแชนเนลรูปคลื่นที่เพิ่มขึ้นนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มขึ้น [1]

ปัจจัยที่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลประกอบไปด้วยอัตราการไหลของของไหลแต่ละสถานะ ความดัน ความเร็ว แรงตึงผิว รูปทรงท่อ มุมเอียงของแนวท่อ ระยะจากทางเข้า รูปแบบการไหลที่เกิดจากการไหลในทิศแนวอนและแนวตั้งจะแตกต่างกัน การไหลสองสถานะในทิศแนวราบก๊าซจะรวมตัวกันที่ด้านบนของท่อเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงลอยตัว รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น Bubbly flow, Stratified flow, Stratified-wavy flow, Plug flow, Slug flow, Annular flow, Intermittent flow, Mist flow [2] ในขณะที่การไหลสองสถานะในทิศแนวตั้งโดยทั่วไปจะมีความสมมาตร รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น Bubbly flow, Cap-bubbly flow, Slug flow, Churn-turbulent flow, Annular flow [3]



ภาพที่ 1.1 รูปแบบการไหลในแนวนอน [2]



ภาพที่ 1.2 รูปแบบการไหลในแนวตั้ง [3]

ซึ่งแผนที่รูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจากการไหลในไมโครแชนเนลรูปตรงนั้นมีผู้ทำการศึกษาวิจัยและจัดทำแผนที่รูปแบบการไหลอย่างแพร่หลาย [4] แต่ไม่มีการวิจัยรูปแบบการไหลในไมโครแชนเนลรูปคลื่นที่เพียงพอที่จะใช้ในการจัดทำแผนที่รูปแบบการไหล การวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นจากการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคลื่นที่อัตราไหลต่างๆและรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาจัดทำแผนที่รูปแบบการไหลเพื่อเป็นเครื่องมือที่ก่อประโยชน์ในการศึกษาปรากฏการณ์ทางกายภาพที่เกิดขึ้นในการไหลสองสถานะและใช้ในการวิจัยอื่น ๆ ต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบรูปแบบทางเข้าของท่อไมโครแชนเนลให้ของไหลทั้งสองสถานะสามารถไหลได้ครบทุกช่อง และของไหลสองสถานะผสมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นก่อนเข้าสู่ช่องไมโครแชนเนล
2. เพื่อสร้างแผนที่รูปแบบการไหลของไมโครแชนเนลรูปคลื่น

1.3 สมมติฐาน

1. ปัญหาการไหลไม่สม่ำเสมอในไมโครแชนเนลรูปคลื่นได้รับการแก้ไขโดยการปรับปรุงทางเข้า
2. พบรูปแบบการไหลที่ให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด คือ Churn flow

1.4 ขอบเขตการดำเนินการ

1. เป็นการศึกษาในรูปแบบการทดลองจริง
2. ใช้สารทำงานคือน้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI) และอากาศในการทดลอง
3. เป็นการไหลแบบไม่มีการเดือด (Non-boiling flow)
4. รูปแบบการไหลในไมโครแชนเนลเป็นการไหลในแนวนอน

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 การไหลของของไหลในไมโครแชนเนล

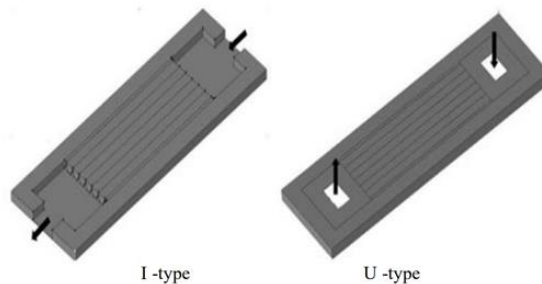
ในช่องทางการไหลสองสถานะนั้นแรงโน้มถ่วงมีอิทธิพลต่อความเค้นเฉือนและแรงตึงผิวสูงมากแต่สำหรับการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนล ค่าความสัมพันธ์ของแรงโน้มถ่วงที่มีอิทธิพลต่อความเค้นเฉือนและแรงตึงผิวจะลดน้อยลง ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญของแรงต่าง ๆ ที่กล่าวมาด้วย

Triplett และคณะ [5] ทำการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ (น้ำ- อากาศ) ในไมโครแชนเนลหน้าตัดวงกลมวางตัวในแนวระนาบ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 1.1 และ 1.45 มิลลิเมตร และในไมโครแชนเนลรูป semi-triangle วางตัวในแนวระนาบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกเท่ากับ 1.09 และ 1.49 มิลลิเมตร โดยความเร็วผิวของอากาศและน้ำอยู่ในช่วงระหว่าง 0.02-80 เมตรต่อวินาที และ 0.02-8 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ จากการทดลองสรุปได้ว่าการไหลภายในท่อกลมและท่อ semi-triangle มีรูปแบบการไหลที่เหมือนกัน อยู่ 5 รูปแบบ คือ Bubbly flow, Slug flow, Churn flow, Slug-annular flow และ Annular flow

Kreutzer และคณะ [6] ได้เสนอการจัดประเภทขนาดของช่องทางการไหลที่มีรูปแบบการไหลสองสถานะโดยใช้ critical Bond number (Bo) กล่าวได้ว่าสำหรับการใช้น้ำและอากาศเป็นของไหลทำงานของการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลนี้ ช่องทางการไหลต้องมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร

Chein และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการไหลของของไหลและการถ่ายเทความร้อนในไมโครแชนเนล โดยการใช้วิธี finite volume scheme เพื่อแก้สมการ three-dimensional governing equations สำหรับของไหลทั้งสอง และใช้วิธีการทางคอมพิวเตอร์ในการจำลองทางเข้า, ทางออก, ช่องว่างและไมโครแชนเนล รูปแบบทางเข้าและทางออกของไมโครแชนเนลในรูปแบบต่างๆ ถูกนำมาศึกษาเพื่อหาผลกระทบต่อการไหลและการถ่ายเทความร้อน รูปร่างของทางเข้าและทางออกของชุดการทดลองนั้นเหมือนกัน แต่ตำแหน่งของทางเข้าและทางออกของแต่ละชุดทดลองนั้นแตกต่างกัน ทำให้การกระจายอุณหภูมิภายในแตกต่างกันเช่นกัน ในการศึกษาได้ออกแบบทางเข้าและทางออกเป็นแบบต่างๆ ผลสรุปได้ว่าไมโครแชนเนลแบบ V-type ซึ่งถูกดัดแปลงมาจาก U-type โดยการเปลี่ยนที่ตำแหน่งจากตรงกลางของช่องผสมเป็นเอียงจากกึ่งกลางของช่องว่างได้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 แบบจำลองไมโครแชนเนลแบบ I - type และ U-type [7]

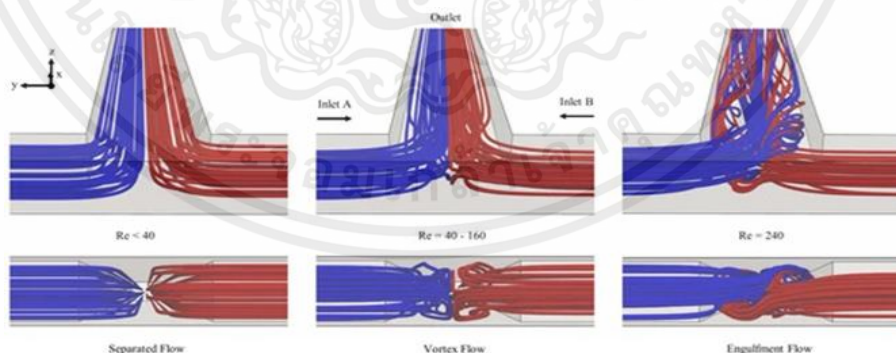
Sur และคณะ [8] ศึกษาการทดลองเรื่องผลกระทบของขนาดไมโครแชนเนลต่อความเร็วผิวและความดันลด ในของไหลสองสถานะ โดยใช้ไมโครแชนเนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1, 0.18, 0.34 มิลลิเมตร ได้ข้อสรุปว่า การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเร็วผิว ความหนาแน่นของของไหล ความหนืดของของไหล ดังนั้นรูปแบบการไหลจึงเป็นผลที่เทียบเป็นความเฉื่อย ความเค้นเฉือน เนื่องจากความโน้มถ่วง และแรงตึงผิว ในการหาความสัมพันธ์ของแรงเหล่านี้สามารถแสดงได้โดยใช้ค่า Reynolds number (Re) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความเฉื่อยกับความหนืด, ค่า Capillary number (Ca) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความหนืดกับแรงตึงผิว และค่าเวเบอร์ Weber number (We) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงตึงผิว

Wang และคณะ [9] ทำการออกแบบและศึกษาไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟ ด้วยแผ่นกั้นสามเหลี่ยมบนช่องการไหลโดยเป็นการทำแบบจำลองในช่วงการไหลตั้งแต่ $Re = 100$ ถึง $Re = 500$ ผลของการผสมจะเห็นได้จากการกระจายความเข้มข้นตามขวางของช่อง ได้เปอร์เซ็นต์ดัชนีผสม 85.5 เปอร์เซ็นต์ ด้วยระยะผสม 6.4 มิลลิเมตรซึ่งดีกว่าแบบทั่วไป 2.48 เท่า ที่ $Re = 100$ และที่ ได้ดัชนีการผสมที่ดีกว่าไมโครมิกเซอร์แบบทั่วไป 4.75 เท่า และ 8.32 เท่า ตามลำดับ และพบว่าจำนวนแผ่นกั้นที่มากขึ้นให้ผลการผสมที่ดีขึ้น

Lin และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการต้านทานการถ่ายเทความร้อน (R) และ ผลต่างของอุณหภูมิที่พื้นผิว ($\Delta T_{b,max}$) โดยการเปรียบเทียบไมโครแชนเนลรูปตรงและไมโครแชนเนลรูปคลื่นที่มีการเปลี่ยนค่าแอมพลิจูดและความยาวคลื่นภายใต้แรงดันปั๊มคงที่ ไมโครแชนเนลรูปคลื่นแบบดั้งเดิมมีแอมพลิจูด $A = 30\mu m$ และมีความยาวคลื่น $\lambda = 2000\mu m$ โดยอีกสี่แบบที่เหลือจะมีการปรับค่าแอมพลิจูดและความยาวคลื่นที่ต่างกันออกไป ในแบบที่หนึ่งและสองแอมพลิจูดจะมีค่าเท่าเดิมแต่ความยาวคลื่นจะต่างกันออกไปที่ $\Delta \lambda = 300$ และ $-300\mu m$ ในแบบที่

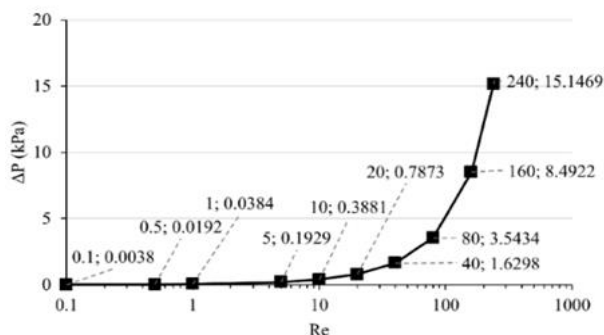
สามและสี่ ความยาวคลื่นจะมีค่าเท่าเดิมแต่แอมพลิจูดจะต่างกันออกไปที่ $A=4.5$ และ $-4.5\mu\text{m}$ จากการทดลอง พบว่า ไมโครเซนเซอร์รูปคลื่นทั้งห้าอันมีค่าความสามารถในการต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำและมี Nu ที่สูงกว่าไมโครเซนเซอร์รูปตรงและเมื่อความยาวคลื่นลดลงและแอมพลิจูดสูงขึ้น ความสามารถในการต้านทานการถ่ายเทความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิที่พื้นผิวลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราส่วนระหว่างแนวตั้งและแนวนอนที่ลดลงยังส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการถ่ายเทความร้อนและผลต่างของอุณหภูมิที่พื้นผิวลดลงอีกด้วย

Okuducu และคณะ [11] กล่าวว่า การไหลแบบราบเรียบเป็นเงื่อนไขที่ทำให้ของไหลสองสถานะในไมโครมิกเซอร์ผสมกันได้ไม่มีประสิทธิภาพ จึงได้ทำการออกแบบไมโครมิกเซอร์ที่มีสันเป็นรูปร่างเว้าวงกลมโดยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผสมของของไหลสองสถานะ โดยใช้ Computational Fluid Dynamics (CFD) ในการจำลอง เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างไมโครมิกเซอร์ทั่วไปและ CSCR ไมโครมิกเซอร์ โดยทดลองที่อัตราการไหลและสัมประสิทธิ์การแพร่หลายค่า การปรับค่าอัตราการไหลหลายค่าทำให้เกิดรูปแบบการไหลหลายรูปแบบ ได้แก่ Separated flow, Vortex flow และ Engulfment flow จากผลการทดลอง พบว่าความดันลดที่ไมโครมิกเซอร์ทั่วไป ค่าความดันลดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างค่าความดันลดน้อยกว่า 1 kPa จนกระทั่ง $Re=40$ และความดันลดจะมีค่าที่สูงที่สุดที่ 15 kPa ที่ $Re=240$ ทำให้เกิดการไหลแบบ Engulfment flow สร้างการผสมของไหลที่มีประสิทธิภาพเนื่องจาก Chaotic advection ผลสรุปคือ ที่สัมประสิทธิ์การแพร่ทุกค่าทำให้ได้ค่า Mixing index ประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองแสดงรูปแบบการไหลต่างๆที่ค่าอัตราการไหลต่างกัน [11]

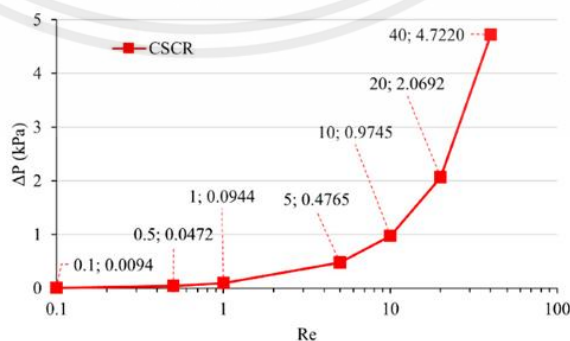
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และ Re ในไมโครมิกเซอร์ทั่วไป [11]

จากการจำลองในไมโครมิกเซอร์ทั่วไปพบว่าการเกิด Chaotic advection จะเกิดในรูปแบบการไหลแบบ Vortex flow และ Engulfment flow เท่านั้น แต่อย่างไรก็ดี ค่า Mixing index ที่ได้นั้นยังไม่ได้ประสิทธิภาพและยังมีค่าความดันลดที่สูง ดังนั้น CSCR ไมโครมิกเซอร์ จึงถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มการเกิด Chaotic advection ภายใต้เงื่อนไขที่ความดันลดต่ำ โดยการทดลองจะทดลองในช่วง $Re=0.1$ ถึง $Re=40$ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มค่า Re สูงขึ้นมากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้เกิด Chaotic advection ซึ่งจะไปเพิ่มค่า Mixing index ที่ดีกว่าไมโครมิกเซอร์ทั่วไปถึง 80 เปอร์เซ็นต์และยังเกิดความดันลดที่น้อยกว่าไมโครมิกเซอร์ทั่วไปเมื่อเทียบที่ค่า Re ที่เท่ากัน โดยพบว่าเกิดความดันลดที่ 2.07 kPa และ 4.72 kPa ที่ $Re=20$ และ $Re=40$ ตามลำดับ

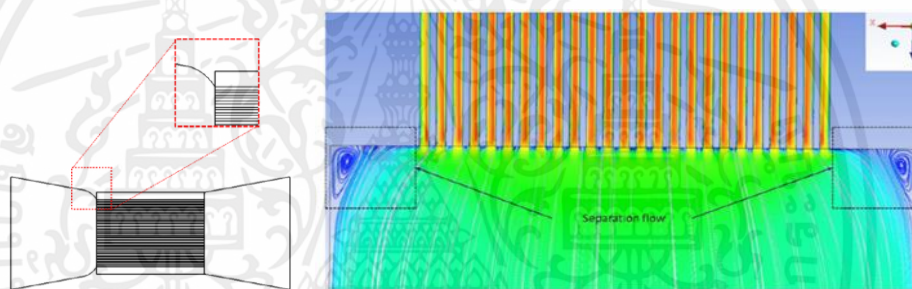
Sowndarya และคณะ [12] ศึกษาการเพิ่มการผสมในการไหลสองสถานะโดยใช้ไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟรูปใบพัด ไมโครแชนเนลทั้งหมดมีความยาว 30 มิลลิเมตร แยกทางเข้าทำมุมกัน 105 องศา ไมโครแชนเนลมีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว 24 มิลลิเมตร ของไหลเป็นน้ำและของไหลนาโนที่ความเข้มข้นต่างกัน ผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าไมโครมิกเซอร์แบบพาสซีฟรูปใบพัดช่วยเพิ่มดัชนีการผสม (Mixing index)



ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และ Re ใน CSCR ไมโครมิกเซอร์ [12]

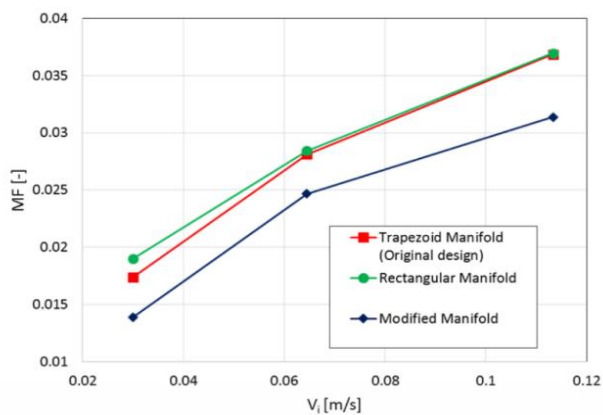
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sahar และคณะ [13] ได้ทำการศึกษาการกระจายของของไหลในไมโครแชนเนล 25 ช่อง จึงได้ออกแบบทางเข้าเพื่อแก้ไขปัญหาการไหลไม่สม่ำเสมอของของไหล โดยใช้โปรแกรม ANSYS-Fluent ใช้วิธี Finite Volume Method (FVM) ในการจำลองใช้สารทำความเย็น R134a เป็นของไหลทำงานและใช้ทองแดงเป็นวัสดุในการจำลองไมโครแชนเนล โดยแบบจำลองที่ใช้จะ กำหนดเงื่อนไขของการไหลคือ 1. สภาวะคงตัว (Steady state) 2. ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) 3. มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) 4. สถานะเดียว (Single phase) 5. ไม่มีการแผ่ความร้อนและเป็นพื้นผิวเรียบ โดยมีการออกแบบรูปร่างต่างๆของบ่อพักน้ำออกเป็นสามรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู รูปแบบสี่เหลี่ยม และรูปแบบที่ถูกดัดแปลง โดยแบบจำลองที่ถูกดัดแปลงมีมุมที่เป็นส่วนโค้งเว้า ได้ว่าแบบที่ถูกดัดแปลงให้การกระจายตัวที่ดีกว่า สองแบบที่เหลือทำให้มีการไหลแบบคงที่ในทุกๆช่องของไมโครแชนเนล



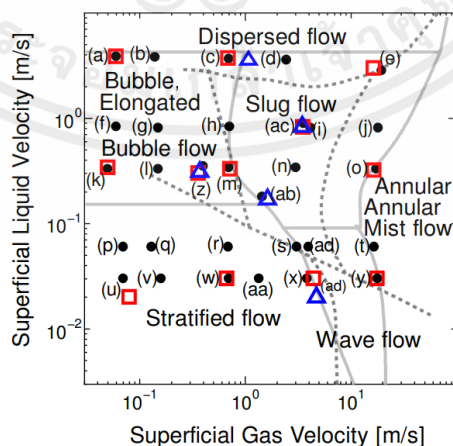
ภาพที่ 2.5 แผนภาพทางเข้าที่ถูกดัดแปลงภาพที่และเส้นการไหลผ่านทางเข้าที่ถูกดัดแปลง [13]

จากผลการทดลองเมื่อนำแบบที่ถูกดัดแปลงมาเปรียบเทียบกับสองแบบที่เหลือที่ความเร็วทางเข้าต่างกันพบว่า ของไหลที่ทางเข้าไมโครแชนเนลมีการไหลที่สม่ำเสมอ เมื่อเทียบค่า Maldistribution Factors กับสองแบบที่เหลือ ค่า MF ของแบบที่ถูกดัดแปลงมีค่าน้อยกว่าแบบที่เหลือ โดยได้ค่า MF = 0.014, 0.025 และ 0.032 ที่ความเร็วทางเข้า $V_{in} = 0.03 \text{ m/s}$, 0.0645 m/s และ 0.113 m/s ตามลำดับ



ภาพที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ของ MF และ V_{in} เมื่อเปรียบเทียบระหว่างทางเข้ารูปแบบต่างๆ [13]

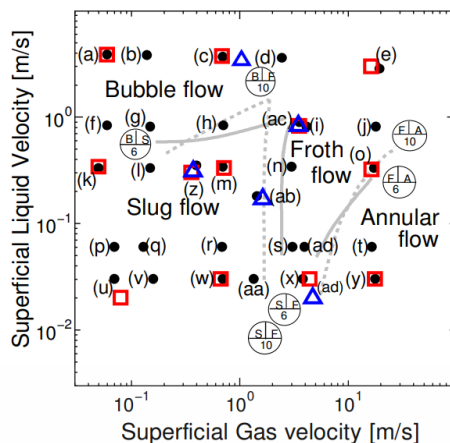
Aziz และคณะ [14] ได้ทำการศึกษา การกระจายตัวของของไหลสองสถานะในท่อกระจายของไหลที่ทำมาจากอะคริลิครีซิน ใช้น้ำและอากาศเป็นของไหลทำงานในการทดลองนี้ ในท่อกระจายของไหลมีช่องทางเข้าหนึ่งท่อและท่อทางออกสองท่อ โดยท่อทางเข้าวางอยู่ในระดับที่สูงกว่าท่อทางออก และยังมีการศึกษาผลกระทบที่มีต่อของไหลสองสถานะเมื่อมีการเปลี่ยนองศาความเอียงของท่อกระจายของไหล ศึกษาความเอียงที่ 0° , 45° , 90° หลังจากนั้นนำมาสร้างเป็นแผนที่รูปแบบการไหลของค่าต่างๆของอัตราการไหลของน้ำและอากาศ โดยจุดสี่ดำสำหรับความเอียงท่อกระจายของไหลที่ 0° หรือท่ออยู่ในแนวนอน สีเหลี่ยมสำหรับความเอียงที่ 45° และสามเหลี่ยมสำหรับความเอียงที่ 90° หรือท่อวางอยู่ในแนวตั้ง ในการทดลองพบรูปแบบการไหลดังนี้ คือ Stratified flow, Wavy flow, Elongated bubble flow, Dispersed flow, Slug flow, Bubble flow และ Annular flow



ภาพที่ 2.7 แผนที่รูปแบบการไหลเมื่อท่อกระจายของไหลมีความเอียง 0 องศา [14]

หรือวางอยู่ในแนวนอน [14]

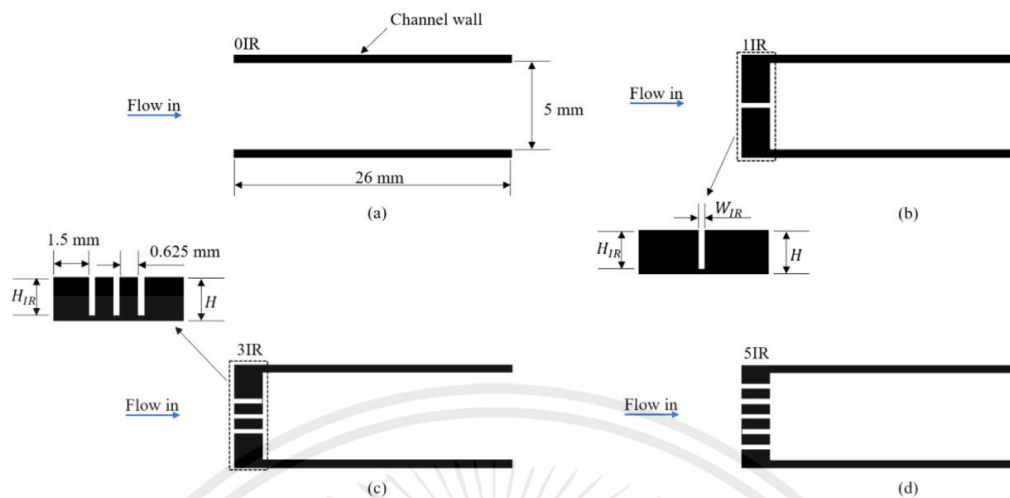
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 แผนที่รูปแบบการไหลเมื่อท่อกระจายของไหลมีความเอียง 90 องศา หรือวางอยู่ในแนวตั้ง [14]

พบว่าเกิดการกระจายตัวของของไหลที่สม่ำเสมอเมื่อท่อกระจายของไหลที่มีความเอียง 90° หรืออยู่ในแนวตั้ง แต่เมื่อท่อกระจายของไหลอยู่ที่มีความเอียง 0° หรืออยู่ในแนวนอนและมีความเอียง 45° การกระจายตัวจะมีความสม่ำเสมอก็ต่อเมื่อมีความเร็วผิวของอากาศที่สูงเท่านั้น

Oudah และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของสมรรถนะการระบายความร้อนในไมโครแชนเนลสี่เหลี่ยมเมื่อมีจำนวนทางเข้าที่จำกัดหลายแบบ ไมโครแชนเนลมีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก $708 \mu\text{m}$ จำนวนทางเข้าจำกัดในการทดลองประกอบไปด้วยสามแบบคือ ทางเข้าหนึ่งช่อง (1IR) ทางเข้าสามช่อง (3IR) และทางเข้าห้าช่อง (5IR) โดยมีฟลักซ์มวลของของไหล 32.68, 81.29 และ $144 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ โดยจำนวนทางเข้าจำกัดต่างๆส่งผลต่อ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความดันลดในไมโครแชนเนลได้ผลลัพธ์จากการทดลองว่า การมีช่องเข้าที่จำกัดส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงในการไหลของของไหลสถานะเดียว แต่สำหรับการไหลของของไหลสองสถานะ พบว่าการมีช่องทางเข้าที่จำกัดสามและห้าช่อง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการมีช่องทางเข้าจำกัดเพียงช่องเดียวและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามฟลักซ์มวลของของไหลที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.9 แสดงรูปร่างของจำนวนทางเข้าจำกัดรูปแบบต่างๆ (a) ไม่มีทางเข้าจำกัดช่องทางการไหล (b) ทางเข้าจำกัด 1 ช่อง (c) ช่องทางจำกัด 3 ช่อง (d) ช่องทางจำกัด 5 ช่อง [15]

และยังได้ผลลัพธ์เรื่องความดันลดอีกด้วย การเพิ่มช่องทางเข้าจำกัดของช่องไหลเป็นการเพิ่มความดันลดซึ่งรูปแบบทางเข้าแบบ 1IR, 3IR และ 5IR เพิ่มความดันลด 5.79, 2.06 และ 1.58 เท่า เมื่อเทียบกับการไม่มีช่องทางเข้าจำกัด ตามลำดับ

2.2 การถ่ายเทความร้อนของของไหลในไมโครแชนเนล

Betz และ Attinger [16] พบว่าการไหลแบบ Segmented flow สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 140 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการไหลสถานะเดียวที่อัตราการไหลเดียวกัน ตัวเลขนี้ทเซลล์ถูกนำมาใช้คิดการถ่ายเทความร้อน โดยในชุดการทดลองใช้ไมโครแชนเนลหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 0.5 มิลลิเมตร ไหลผ่านข้อต่อสามทางรูปตัวที เมื่อเปรียบเทียบที่ความดันลดเท่ากัน Segmented flow ให้เลขนี้ทเซลล์สูงกว่าการไหลแบบสถานะเดียว แต่ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นในช่วงของอัตราการไหลที่จำเพาะ

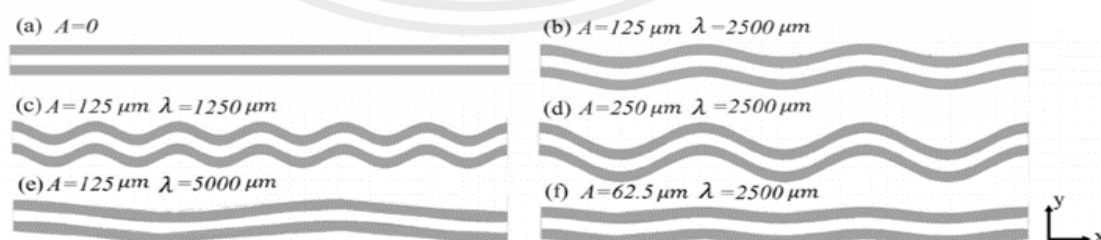
Asthana และคณะ [17] ทำการศึกษาวิจัยที่มีความใกล้เคียงกับงานของ Betz และ Attinger โดยทำการศึกษาค่าตัวเลขนี้ทเซลล์การถ่ายเทความร้อนของการไหลสองสถานะ (liquid-liquid emulsion) ของน้ำกลั่นและแวกซ์เหลวที่เหลือจากการกลั่นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (Mineral oil) ในช่องทางการไหลที่มีความคดเคี้ยว (Serpentine section) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก 0.1 มิลลิเมตร พบว่าสามารถเพิ่มค่าตัวเลขนี้ทเซลล์ขึ้นเมื่อเทียบกับการไหลแบบสถานะเดียวของน้ำ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานทั้งสองมีข้อสรุปไปในแนวทางเดียวกันว่าการเพิ่มการถ่ายเท ความร้อนออกจากระบบยังแปรผันตรงกับ การเพิ่มขึ้นของความดันตกที่เกิดขึ้นในระบบอีกด้วย

Choo และ Kim [18] ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยไม่มี การเดือดของการไหลแบบสองสถานะที่มีน้ำและอากาศเป็นของไหลทำงานในไมโครแชนเนลหน้าตัดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.140, 0.222, 0.334 และ 0.506 มิลลิเมตร พบว่าค่าตัวเลขนัสเซิลท์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของแก๊สในไมโครแชนเนลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.334 มิลลิเมตร และ 0.506 มิลลิเมตร แต่ในช่องทางการไหลขนาด 0.14 มิลลิเมตร และ 0.222 มิลลิเมตร กลับให้ผลที่แตกต่างกันคือ เมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของแก๊ส ค่าตัวเลขนัสเซิลท์จะลดลง นอกจากนี้แฟกเตอร์ความเสียดทานของของไหลสองสถานะจะน้อยลงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเกิดจากแรงตึงผิวและอิทธิพลของความเค้น

Sakanova และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาการทดลองเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดและความยาวคลื่นของไมโครแชนเนลรูปคลื่น โดยไมโครแชนเนลรูปคลื่นมีค่าแอมพลิจูดสามค่าคือ 25 μm , 50 μm และ 75 μm และมีค่าความยาวคลื่นสองค่าคือ 0.25 mm และ 0.5 mm ที่ค่าอัตราการไหลของปริมาตรต่างๆตั้งแต่ 0.152 L/min ถึง 0.354 L/min ใช้ของไหลเป็นของไหลนาโนที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 1-5% ผลสรุปคือ ยิ่งแอมพลิจูดสูงและความยาวคลื่นสั้น ความสามารถในการต้านทานการถ่ายเทความร้อนจะลดลง และความดันตกจะเพิ่มขึ้น

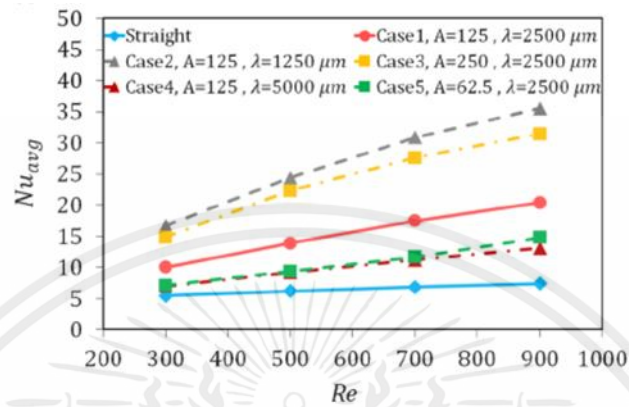
Ghorbani และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนรูปคลื่น โดยทำแบบจำลองออกมา 5 แบบ โดยพิจารณาแอมพลิจูดที่ช่วง 62.5 - 250 μm และความยาวคลื่นช่วง 1250 - 5000 μm ควบคุมการไหลให้เป็นการไหลแบบราบเรียบซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง $Re = 300$ ถึง $Re = 900$ มีการให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ 80 W/cm^2



ภาพที่ 2.10 มุมมองจากด้านบนของไมโครแชนเนลรูปแบบต่างๆ [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองผ่านโปรแกรมได้ผลออกมาว่า ไมโครแขนเนลแบบ (c) ที่มีแอมพลิจูด $125 \mu\text{m}$ ความยาวคลื่นที่ $1250 \mu\text{m}$ ได้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด แต่เนื่องจากมีความดันตกคร่อมที่มาก ทำให้ไมโครแขนเนลแบบ (d) มีประสิทธิภาพที่สามารถใช้งานจริงได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า การเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการเพิ่มหรือลดแอมพลิจูด



ภาพที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_{avg} และ Re [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 การไหลของของไหลสองสถานะในไมโครแชนเนล

ในการไหลของของไหลตัวเลขเรย์โนลด์เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความปั่นป่วนของการไหลซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าของตัวเลขนซ์เซิลท์อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าตัวเลขนซ์เซิลท์เป็นตัวแปรไร้มิติที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่เคลื่อนที่กับวัตถุที่เป็นของแข็งหรือผนังท่อในการไหลของของไหลสองสถานะแบ่งเป็นการไหลตามผิวของของเหลวและตามผิวของก๊าซ

3.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของเหลว (Superficial liquid Reynolds number)

สามารถคำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของเหลวได้จากสมการที่ (3.1)

$$Re_{SL} = \frac{\rho_L J_{SL} D_h}{\mu_L} \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_L คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
 J_{SL} คือ ความเร็วผิวของของเหลว (m/s)
 D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)
 μ_L คือ ความหนืดของของเหลวที่อุณหภูมิเฉลี่ย ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)
 J_{SL} หาได้จากได้จากสมการที่ (3.2)

$$J_{SL} = \frac{G_L}{\rho_L} = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L A} \quad (3.2)$$

เมื่อ \dot{m}_L คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว (kg/s)

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (D_h) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4(H_f \times S_c)}{(2H_f + 2S_c)} \quad (3.3)$$

3.1.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของก๊าซ (Superficial gas Reynolds number)

สามารถคำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ในการไหลตามผิวของเหลวได้จากสมการที่ (3.4)

$$Re_{SG} = \frac{\rho_G J_{SG} D_h}{\mu_G} \quad (3.4)$$

เมื่อ ρ_G คือ ความหนาแน่นของของก๊าซ (kg/m^3)

J_{SG} คือ ความเร็วผิวของของก๊าซ (m/s)

μ_G คือ ความหนืดของก๊าซที่อุณหภูมิเฉลี่ย ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

เมื่อ J_{SG} ความเร็วผิวของของก๊าซ (Superficial velocity of liquid)

ซึ่งหาได้จากได้จากสมการที่ (3.5)

$$J_{SG} = \frac{G_G}{\rho_G} = \frac{\dot{m}_G}{A} \quad (3.5)$$

เมื่อ \dot{m}_G คือ อัตราการไหลเชิงมวลของก๊าซ (kg/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางการไหลของของไหลทุกสถานะรวมกัน (m^2)

อัตราส่วนเชิงมวล x สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \quad (3.6)$$

3.1.3 ตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะ

ตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบสองสถานะหาได้จากสมการที่ (6)

$$Re_{TP} = \frac{G_{TP} D_h}{\mu_{TP}} \quad (3.7)$$

เมื่อ G_{TP} คือ ฟลักซ์มวลของของไหลสองสถานะ ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)

μ_{TP} คือ ความหนืดจลน์ของของไหลสองสถานะ ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$) ตามสมการของ McAdams

และคณะ [21] สามารถหาได้ดังสมการ

$$G_{TP} = G_L + G_G = \rho_L J_{SL} + \rho_G J_{SG} \quad (3.8)$$

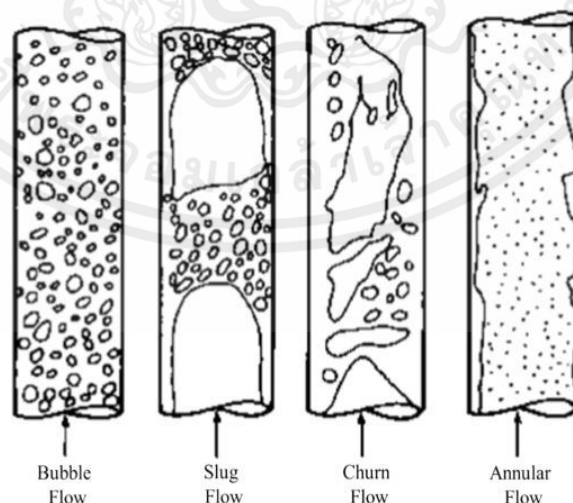
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_{TP} = \left[\frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L} \right]^{-1} \quad (3.9)$$

3.2 รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะที่ไหลในไมโครแชนเนล

การศึกษาลักษณะการไหลสองสถานะของของไหลในไมโครแชนเนล สามารถแบ่งการศึกษาผลการวิจัยออกเป็นแผนที่การไหลของของไหลสองสถานะและสัดส่วนช่องว่าง (void fraction) ซึ่งแผนที่การไหลมีผลโดยตรงต่อความดันตกและการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งรูปแบบการไหลออกเป็น 4 ประเภท โดยในท่อนที่หน้าตัดกลมมีลักษณะดังนี้

1. bubbly flow มีลักษณะการไหลเป็นฟองก๊าซขนาดเล็กไหลอยู่ค่อนไปทางส่วนบนของท่อ เนื่องจากฟองก๊าซมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลวส่งผลให้ลอยตัวขึ้น
2. slug flow เกิดเมื่อคลื่นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นของก๊าซและของเหลวใน wavy flow เกิดสูงขึ้นจนยอดคลื่นถึงผนังด้านบนของท่อ
3. Churn flow รูปแบบการไหลที่มีรูปร่างของฟองก๊าซบิด เบี้ยวไป เนื่องจากฟองก๊าซมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น โดยที่รูปแบบการไหลแบบนี้อาจจะไม่มีการสัมผัสของของไหลให้เห็นเมื่อท่อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย
4. annular flow รูปแบบการไหลที่มีก๊าซอยู่ที่แกนกลางของท่อและมีละอองของเหลวเคลื่อนที่กระจายตัวอยู่และมีของเหลวไหลเป็นชั้นฟิล์มวงแหวนรอบผนังท่อ ฟิล์มของของเหลวชั้นล่างจะหนากว่าชั้นบน



ภาพที่ 3.1 รูปแบบการไหลในไมโครแชนเนล

Gustavo Montoya [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การถ่ายเทความร้อน

3.3.1 ค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number) คือ ตัวแปรไร้มิติของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Nu = \frac{hD_h}{k_L} \quad (3.10)$$

เมื่อ	h	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหล ($W/m^2 \cdot K$)
	k_L	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_m ($W/m \cdot K$)
	T_m	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทำงานที่ทางเข้าและทางออก (K)

3.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะต้องคำนวณหาค่าพลັกซ์ความร้อนผิวของไมโครแชนเนลและต้องหาค่าอุณหภูมิที่ผิวไมโครแชนเนล ซึ่งสามารถหาได้จากการวัดอุณหภูมิด้วยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิโดยสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลหาได้จาก

$$h = \frac{\dot{Q}}{N(A_{cb} + 2A_{cs}\eta_f)(T_w - T_m)} \quad (3.11)$$

$$A_{cb} = S_c \times L_t \quad (3.12)$$

$$A_{cs} = 2(H_f \times L_t) \quad (3.13)$$

$$\dot{Q} = (\dot{m}_l c_{p,l} + \dot{m}_g c_{p,g})(T_{out} - T_{in}) \quad (3.14)$$

เมื่อ	N	คือ จำนวนไมโครแชนเนลทั้งหมด
	A_{cb}	คือ พื้นที่ด้านล่างที่ใช้ในการหาความร้อนแต่ละช่อง (m^2)
	A_{cs}	คือ พื้นที่ด้านข้างที่ใช้ในการหาความร้อนแต่ละช่อง (m^2)
	η_w	คือ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีป
	T_w	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่พื้นผิวของไมโครแชนเนล หาได้จากการประมาณค่านอกช่วง (K)
	L_t	คือ ความยาวทั้งหมดของแต่ละช่อง (m)
	\dot{Q}	คือ ปริมาณความร้อนที่ของไหลได้รับ (W)
	V	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล (m^3/s) วัดได้โดยใช้เครื่องมือวัดการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) สามารถคำนวณได้จาก T_m
 c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$) สามารถคำนวณได้จาก T_m

3.3.3 ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีป (η_f)

สำหรับการหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของครีปใช้เงื่อนไขว่าไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายครีป (Adiabatic fin tips) เนื่องจาก มีแผ่นยางยูรีเทนและแผ่นอะคริลิคปิดอยู่ที่ด้านบนครีปไมโครเซนเนล ดังนั้นสามารถหาได้จากสมการดังนี้

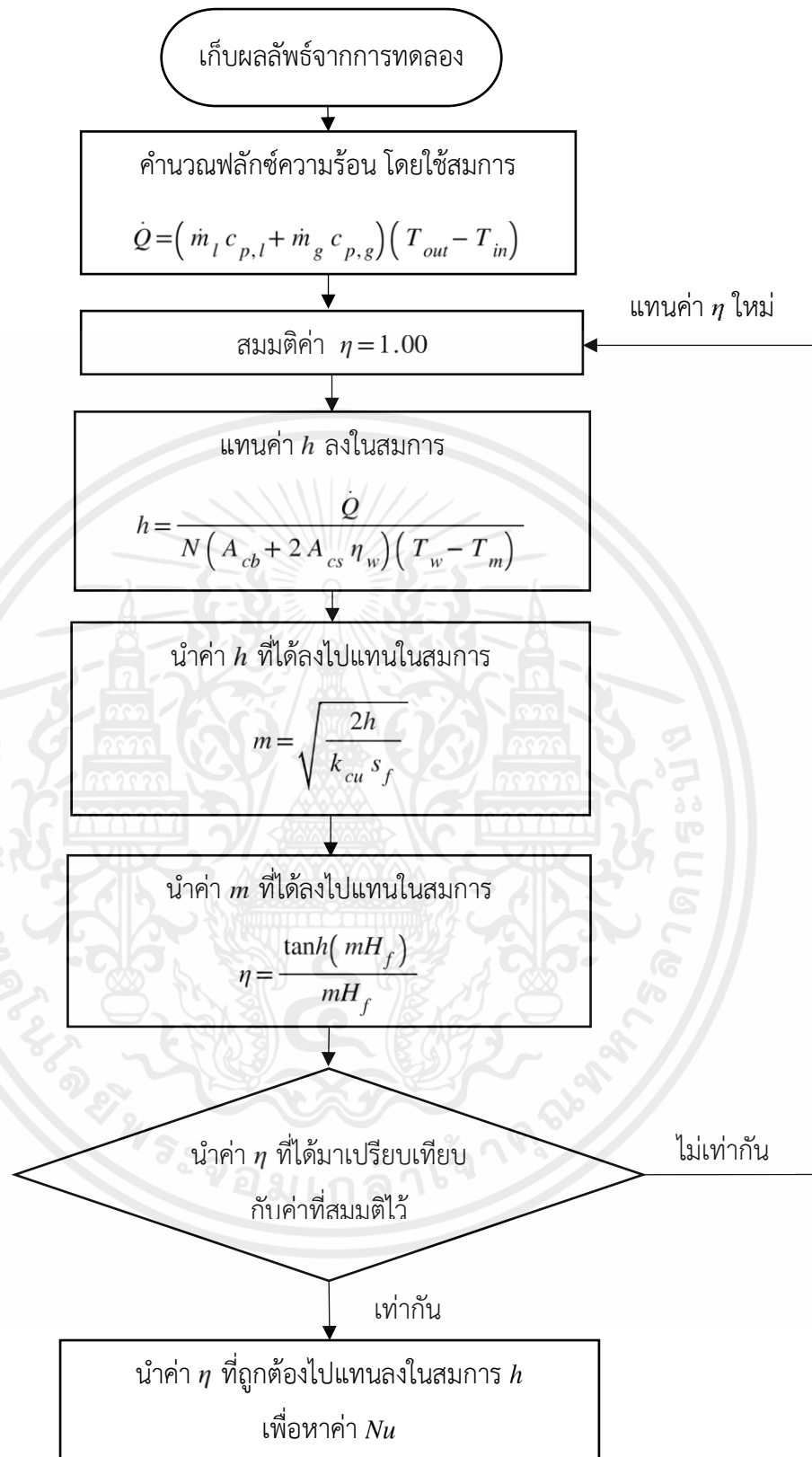
$$\eta_f = \frac{\tanh(mH_f)}{mH_f} \quad (3.15)$$

- เมื่อ H_f คือ ความสูงของครีป (m)
 m คือ ค่าคงที่ คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$m^2 = \frac{2h}{k_{cu} S_f} \quad (3.16)$$

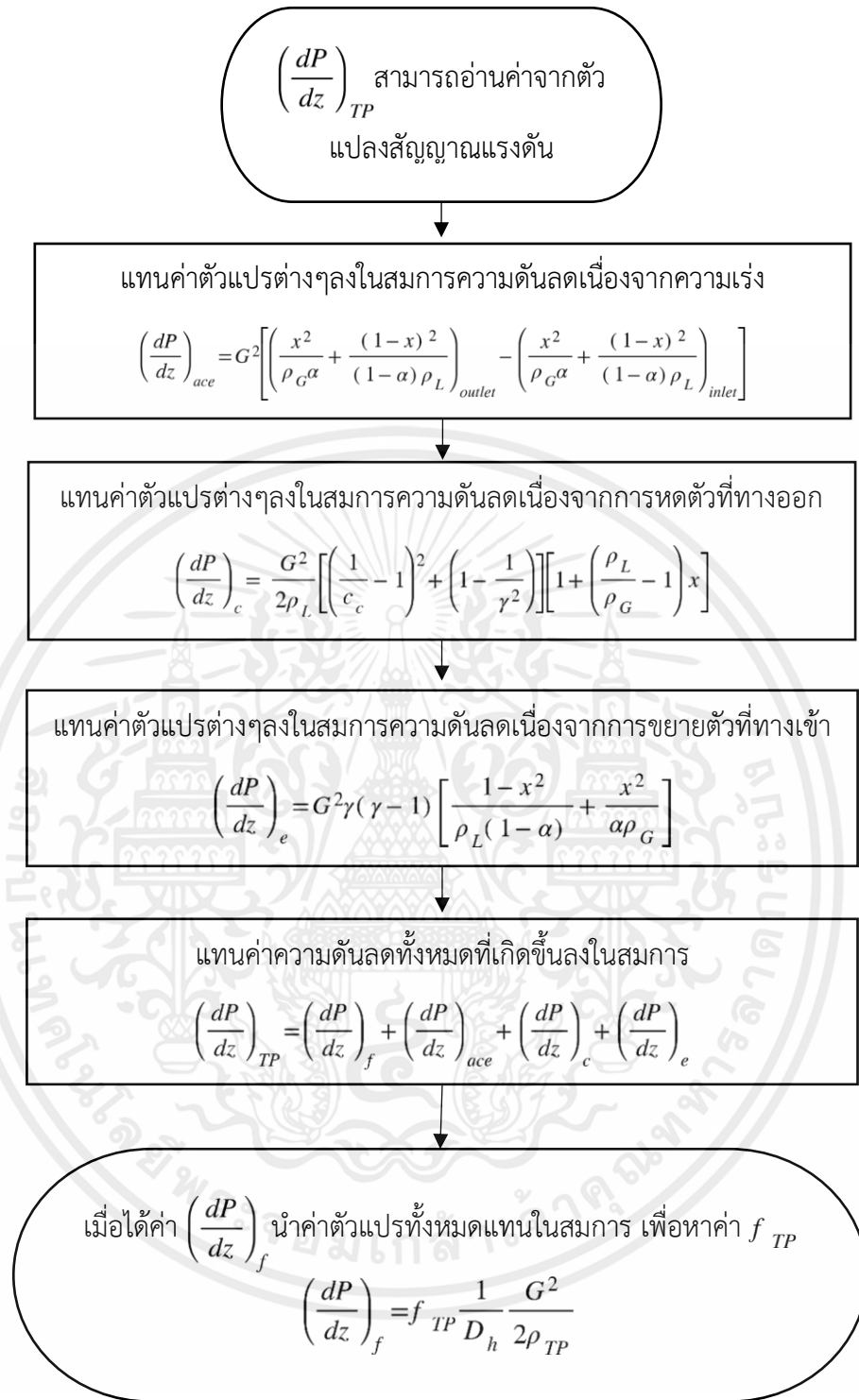
- เมื่อ k_{cu} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองแดง ($\text{W/m} \cdot \text{k}$)
 โดย $k_{cu} = 401 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ [23]
 S_f คือ ความหนาของครีป (m)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของครีป จำเป็นที่จะต้องอาศัยกระบวนการทำซ้ำ (Iteration process) ในการประมาณค่า โดยใช้ขั้นตอนการทำซ้ำดังแผนภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 3.2 แผนภาพแสดงวิธีการคำนวณตัวเลขนิตเซลล์ท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 แผนภาพแสดงวิธีการคำนวณแฟกเตอร์ความเสียดทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทำนายตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะ

3.4.1 ตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อตรง

Chuanshuai Dong และ Takashi Hibiki [24] ได้นำเสนอสหสัมพันธ์ที่ใช้ในการทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยในกรณีที่มีการไหลสองสถานะภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือด ดังต่อไปนี้

$$Nu_{1\phi} = 1.86 (Re Pr D/L)^{1/3} \left(\frac{\mu_m}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.17)$$

$$\frac{Nu_{2\phi}}{Nu_{1\phi}} = (1 - \alpha)^{0.257} (1 + 4.27X - 0.697) \quad (3.18)$$

เมื่อ	μ_m	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ยของไหล (kg/m·s)
	μ_w	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลที่อุณหภูมิพื้นผิว (kg/m·s)
	$Nu_{1\phi}$	คือ ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของของไหลสถานะเดียว
	$Nu_{2\phi}$	คือ ค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของของไหลสองสถานะ
	α	คือ สัดส่วนช่องว่าง
	X	คือ ตัวแปรไร้มิติของ Lockhart–Martinelli

สัดส่วนช่องว่างหาได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{J_{SL}}{J_{SG}} \times \frac{(1-x)}{x} \times \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)} \quad (3.19)$$

เมื่อ x คือ คุณภาพไอ หาได้จากสมการที่ 3.6

ตัวแปรไร้มิติของ Lockhart–Martinelli [25] หาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$X = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (3.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อคลื่น

Kalb และ Sheader [26] ได้นำเสนอสหสัมพันธ์ที่ใช้ในการทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยของการไหลสองสถานะในท่อคลื่นในกรณีที่มีการไหลแบบราบเรียบภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการเดือด

$$Nu_{TP} = 0.913 De^{0.476} Pr_{TP}^{0.2} \quad (3.21)$$

ที่ฟลักซ์ความร้อนพื้นผิวคงที่ไว้ (Constant-surface heat flux) ไว้ดังนี้

$$\text{โดยมีเงื่อนไขคือ} \quad 0.7 \leq Pr_{TP} \leq 5$$

$$\text{และ} \quad 80 \leq De \leq 1200$$

3.4.2 ตัวเลขดีน (Dean number)

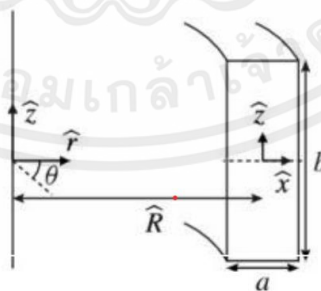
ตัวเลขดีนเป็นตัวเลขที่ใช้สำหรับศึกษาท่อโค้งโดยบ่งบอกถึงเงื่อนไขในการเกิดกระแสน้ำวนภายในท่อ ประกอบด้วย ตัวเลขเรย์โนลด์, อัตราส่วนของรัศมีความโค้งและเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ยิ่งตัวเลขดีนมีค่าสูงกระแสน้ำวนที่เกิดขึ้นยิ่งรุนแรงซึ่งมีผลต่อความปั่นป่วนและสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวเลขดีน (Dean number) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$De = Re \sqrt{\frac{D_h}{2R_c}} \quad (3.22)$$

เมื่อ Re คือ เลขเรย์โนลด์ของการไหลของของไหลสถานะเดียว, ของไหลสองสถานะ

R_c คือ รัศมีความโค้งของเส้นทางการไหลแซนเนล (m)



ภาพที่ 3.4 แสดงรัศมีความโค้งของท่อรูปคลื่น [27]

3.4.3 ตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number)

ตัวเลขพรันด์เทิล เป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของของไหลในการส่งผ่านโมเมนตัมในของไหลเมื่อเทียบกับการส่งผ่านความร้อนในของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเลขพรีนดท์เทิล (Prandtl number) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Pr_{Tp} = \frac{\mu_{TP} c_{p,TP}}{k_L} \quad (3.23)$$

เมื่อ $c_{p,TP}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของของไหลสองสถานะ (J/kg·K) ใช้ค่าที่ T_m

3.5 สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance index)

Colaco และคณะ [28] ได้นำเสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance index, PI) ไว้ดังสมการต่อไปนี้

$$PI = \frac{Nu_{wavy}/Nu_{straight}}{f_{wavy}/f_{straight}} \quad (3.24)$$

เมื่อ Nu_{wavy} คือ ตัวเลขนัสเซิลท์ของของไหลสองสถานะในท่อคลื่น
 $Nu_{straight}$ คือ ตัวเลขนัสเซิลท์ของของไหลสองสถานะในท่อตรง
 f_{wavy} คือ แฟกเตอร์ความเสียดทานของของไหลสองสถานะในท่อคลื่น
 $f_{straight}$ คือ แฟกเตอร์ความเสียดทานของของไหลสองสถานะในท่อตรง

หากสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าหนึ่งจะเป็นการบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันลด ซึ่งหมายความว่า เป็นสถานะที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ แต่หากสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าหนึ่งจะเป็นการบ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันลด ซึ่งหมายความว่า เป็นสถานะที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

3.6 ความดันลดในช่องทางการไหลแบบสองสถานะ

ความดันตกคร่อมทั้งหมดสำหรับการไหลของของไหลสองสถานะ สามารถถูกวัดได้โดยเครื่องวัด ความดันที่ติดตั้งไว้ระหว่างทางเข้าและทางออกของชุดทดสอบ โดยความดันลดทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย ความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทาน, ความดันลดเนื่องจากความเร่ง, ความดัน

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_f + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{acc} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_c + \left(\frac{dP}{dz}\right)_e \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดที่เกิดจากการหดตัวของของไหลที่ทางออก และความดันลดที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลที่ทางเข้า ซึ่งองค์ประกอบของความดันลดทั้งหมดสามารถพิจารณาได้ตามสมการ ดังนี้

3.6.1 ความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทาน

ความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานเป็นความดันลดที่เกิดจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการไหลของของไหลกับผนังท่อ โดยสามารถนิยามสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_f = f_{TP} \frac{1}{D_h} \frac{G^2}{2\rho_{TP}} \quad (3.26)$$

เมื่อ f_{TP} คือ แฟกเตอร์ความเสียดทานของการไหลแบบสองสถานะ

3.6.2 ความดันลดเนื่องจากความเร่ง

ความดันลดเนื่องจากความเร่งเป็นความดันลดที่เกิดจากการปรับอัตราการไหลของของไหลให้เพิ่มขึ้นทั้งสองสถานะ โดยสามารถนิยามสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{acc} = G^2 \left[\left(\frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{outlet} - \left(\frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{inlet} \right] \quad (3.27)$$

3.6.3 ความดันลดที่เกิดจากการหดตัวของของไหลที่ทางออก

ความดันลดที่เกิดจากการหดตัวของของไหลที่ทางออก เกิดเมื่อไหลจากช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ไหลออกมาสู่ช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กกว่า โดยสามารถนิยามสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_c = \frac{G^2}{2\rho_L} \left[\left(\frac{1}{c_c} - 1 \right)^2 + \left(1 - \frac{1}{\gamma^2} \right) \right] \left[1 + \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) x \right] \quad (3.28)$$

เมื่อ γ คือ อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของท่อที่เชื่อมต่อกับท่อ

C_c คือ สัมประสิทธิ์การหดตัว ซึ่งคำนวณได้จากสมการสหสัมพันธ์ของ Chisholm [29] ดังต่อไปนี้

$$C_c = \frac{1}{0.639 \left[1 + \frac{1}{\gamma} \right]^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (3.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.4 ความดันลดที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลที่ทางเข้า

ความดันลดที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลเมื่อไหลจากช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดเล็กเข้าไปสู่ช่องทางการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่กว่าก่อนที่จะแบ่งเข้าสู่ท่อไมโครแชนเนล โดยสามารถนิยามสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_e = G^2 \gamma (\gamma - 1) \left[\frac{1 - x^2}{\rho_L (1 - \alpha)} + \frac{x^2}{\alpha \rho_G} \right] \quad (3.30)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

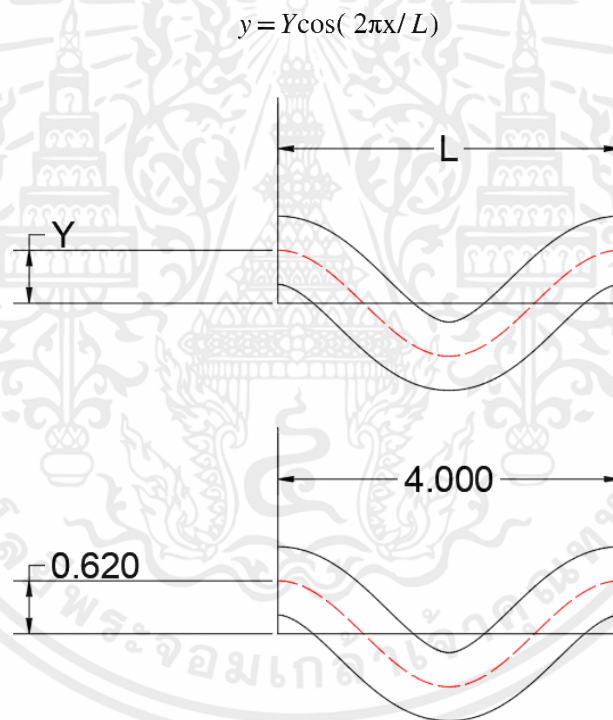
บทที่ 4

การออกแบบชุดทดลอง

4.1 การทำงานและรายละเอียดของชุดทดลอง

4.1.1 คุณสมบัติของไมโครเซนเนลรูปคลื่น

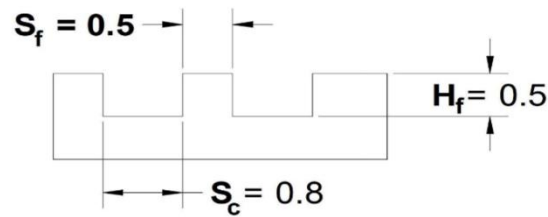
แผ่นทองแดงมีไมโครเซนเนลจำนวน 25 ช่อง ซึ่งแต่ละช่องมีความสูงของท่อ (H_f) เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ความกว้างของท่อ (S_c) เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร ความยาวของท่อทั้งหมด (L_f) เท่ากับ 40 มิลลิเมตร และมีแอมพลิจูด (Y) เท่ากับ 0.62 มิลลิเมตร สมการของท่อไมโครเซนเนลในแนวราบเป็นดังนี้



ภาพที่ 4.1 พารามิเตอร์ของไมโครเซนเนลเมื่อมองจากด้านบน

เมื่อ	Y	คือ แอมพลิจูดของท่อรูปคลื่น (m)
	x	คือ ระยะตามแนวแกนระดับของการไหล (m)
	L	คือ ความยาวของท่อรูปคลื่น (m)

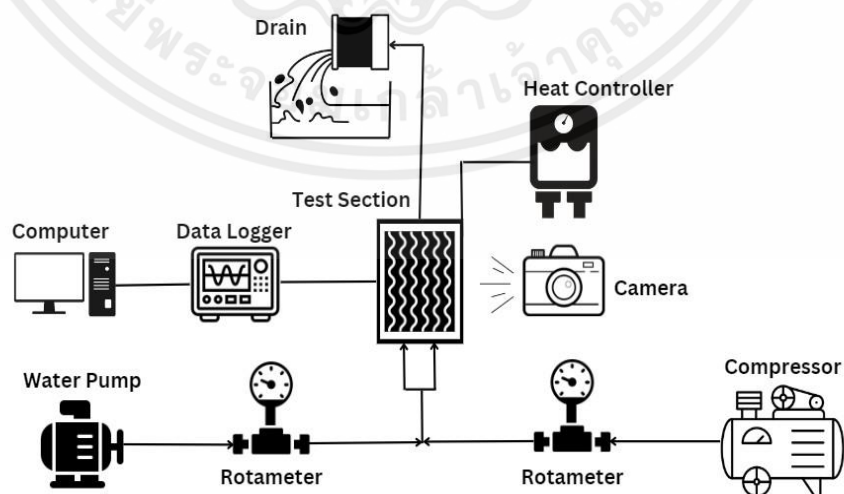
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 พารามิเตอร์ของไมโครแชนเนลเมื่อมองจากด้านหน้า

4.1.2 แผนผังการทำงานของชุดทดลอง

แสดงวงจรการทำงานของชุดทดลอง ซึ่งเริ่มจากปั้มน้ำขนาด 19 W สูบน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) จากแท่งน้ำอะคริลิกผ่านโรตاميเตอร์ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของของไหลได้ และมีปั้มน้ำ ผ่านตัวควบคุมความดันซึ่งมีหน้าที่ควบคุมให้การไหลของอากาศให้คงที่ผ่านโรตاميเตอร์จากนั้นน้ำจะไปผสมกับอากาศที่ mixing chamber เป็นแบบตัววาย ก่อนที่จะไหลเข้าไมโครแชนเนลโดยบริเวณไมโครแชนเนลจะมีเทอร์โมคัปเปิลคอยวัดอุณหภูมิของของไหลทั้งขาเข้าและขาออกรวมถึงวัดอุณหภูมิผนังท่อตรงกลางของชั้นทองแดง 4 ตำแหน่ง และมีตัวแปลงสัญญาณแรงดันคอยวัดความดันที่ขาเข้า โดยภายในไมโครแชนเนลทองแดงจะมีฮีตเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ความร้อนกับทองแดง หลังจากที่ของไหลไหลออกจากไมโครแชนเนลแล้ว ข้อมูลในส่วนของอุณหภูมิ ทั้ง 6 ตำแหน่งจะถูกส่งผ่านมายัง data logger และถูกแสดงมายังคอมพิวเตอร์ น้ำที่ไหลออกมาจากชุดทดลองแล้วจะถูกนำไปลดอุณหภูมิเพื่อนำมาใช้ในการทดลองครั้งต่อไป ในส่วนของรูปแบบการไหลต่างๆ ของการไหลสองสถานะจะถูกบันทึกด้วยกล้อง



ภาพที่ 4.3 แผนผังการทำงานของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ขั้นตอนการสำรวจส่วนประกอบของชุดทดลองและปรับปรุงชุดทดลอง

เนื่องจากความเสื่อมสภาพของซิลิโคนที่ใช้ยึดผนังถังอะคริลิกเข้ากับฐานทำให้เกิดการรั่วซึม บริเวณรอยต่อระหว่างผนังถังและฐาน จึงทำการซ่อมบำรุงด้วยการนำซิลิโคนเก่าออกและทำการยิงซิลิโคนใหม่เพื่อเป็นการยึดติดถังอะคริลิกกับฐานป้องกันการรั่วซึม



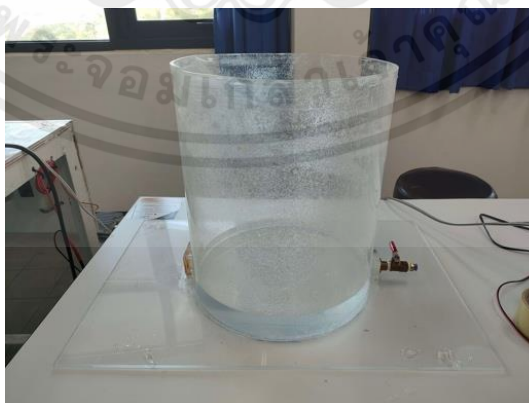
ภาพที่ 4.4 ยิงซิลิโคนยึดติดกับถังอะคริลิก

อุปกรณ์จ่ายไฟเดิมชำรุดจึงต้องทำการต่อสายไฟป้อนเข้ากับอุปกรณ์จ่ายไฟเครื่องใหม่ และต่อสายไฟกระแสสลับกับอุปกรณ์จ่ายไฟ เพื่อแปลงไฟเป็นกระแสตรงจ่ายให้ปั๊ม

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

1. ถังอะคริลิกเก็บน้ำ ใช้สำหรับเก็บน้ำปราศจากไอออน



ภาพที่ 4.5 ถังอะคริลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปั้มน้ำ ขนาด 19 w ใช้สำหรับปั้มน้ำปราศจากไอออนเข้าไมโครเซนเนล มีการคำนวณขนาดของปั้มน้ำที่ภาคผนวก ค



ภาพที่ 4.6 ปั้มน้ำ

3. ปั้มลม ขนาด 7 บาร์ ใช้สำหรับให้อากาศเข้าไปในไมโครเซนเนลเพื่อผสมกับน้ำ



ภาพที่ 4.7 ปั้มลม

4. ตัวควบคุมความดัน ทำหน้าที่ควบคุมความดันที่เข้าเพื่อจะได้ส่งความดันออกไปตามที่ถูกกำหนด



ภาพที่ 4.8 ตัวควบคุมความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. โรตاميเตอร์ ทำหน้าควบคุมอัตราการไหลที่เข้ามาและส่งออกในอัตราการไหลที่กำหนด



ภาพที่ 4.9 โรตاميเตอร์

6. ฮีตเตอร์ ทำหน้าที่ให้ความร้อนโดยการเปลี่ยนไฟฟ้าเป็นความร้อนสามารถปรับความร้อนได้ระหว่าง 0 – 100%

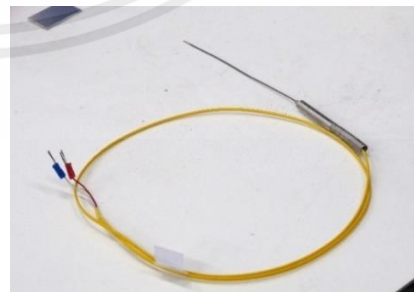


ภาพที่ 4.10 ฮีตเตอร์

7. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด T และ J เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิ โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากโลหะตัวนำที่ต่างกัน 2 ชนิด



(a)

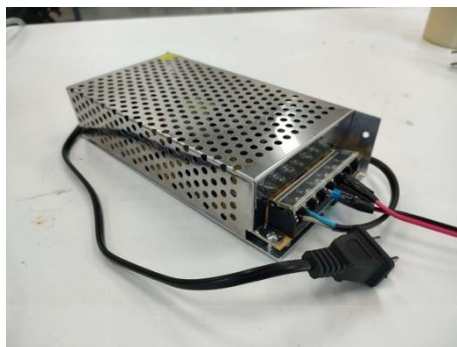


(b)

ภาพที่ 4.11 เทอร์โมคัปเปิล (a) ชนิด T (b) ชนิด J

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. อุปกรณ์จ่ายไฟ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงเพื่อจ่ายให้ปั้มน้ำ



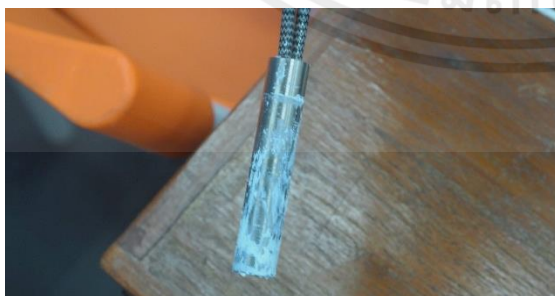
ภาพที่ 4.12 อุปกรณ์จ่ายไฟ

9. เซ็นเซอร์ความดัน เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความดันของก๊าซหรือของเหลว ซึ่งใช้ในการวัดความดันของการไหลสองสถานะในไมโครเซนเนล



ภาพที่ 4.13 เซ็นเซอร์ความดัน

10. คาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์จำนวน 2 แท่ง สำหรับให้ความร้อนกับก้อนทองแดง โดยตามข้อกำหนดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร, ความยาว 60 มิลลิเมตร, กำลังไฟ 180 วัตต์ มีการทาซิลิโคนนำความร้อนที่ฮีตเตอร์เพื่อการนำความร้อนของฮีตเตอร์



(a)



(b)

ภาพที่ 4.14 คาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ (a) ทาซิลิโคนนำความร้อน (b) ไม่ทาซิลิโคนนำความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เครื่องวัดและบันทึกสัญญาณ เป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลเพื่อแสดงผลอุณหภูมิของทองแดงที่ตำแหน่งต่างๆ รวมถึงอุณหภูมิขาเข้ากับอุณหภูมิขาออกของไมโครเซนเนล และวัดค่าความดันที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดความดัน



ภาพที่ 4.15 เครื่องวัดและบันทึกสัญญาณ

12. กล้องถ่ายรูป Olympus e-m10 mark III ความเร็วชัตเตอร์ 1:4000 สำหรับถ่ายภาพในการรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ



ภาพที่ 4.16 กล้องถ่ายรูป Olympus e-m10 mark III



ภาพที่ 4.17 ขาตั้งกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

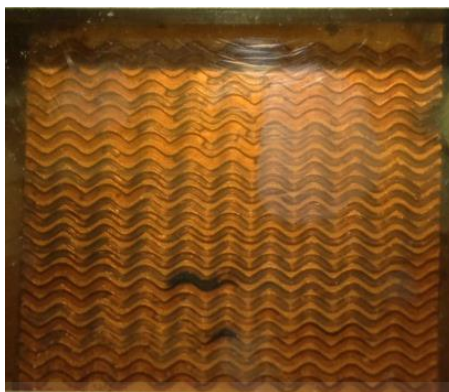


ภาพที่ 4.18 การติดตั้งกล้องสำหรับถ่ายภาพการไหล

4.4 การทดสอบและอ่านค่าจากชุดทดลองเดิม

1. เตรียมชุดทดลองโดยเติมน้ำปราศจากไอออนในถังให้ระดับน้ำสูงกว่าทางเข้าของปั๊มน้ำที่วางไว้ในถัง
2. เมื่อเปิดสวิตช์ปั๊มน้ำและปั๊มลมให้ระบบทำงานแล้วจึงทำการเปิดเครื่องให้ความร้อน
3. ปรับค่าอัตราการไหลของน้ำและอากาศ
4. เปิดเครื่องรับสัญญาณอนาล็อก พร้อมกับเปิดโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลค่าที่วัดได้จากเครื่องรับสัญญาณ โปรแกรมที่ใช้ประกอบด้วย OD04 AI ใช้ในการวัดค่าในขณะนั้น และบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ Utility ใช้ในการตั้งค่า และอ่านค่าในขณะนั้น
5. สังเกตการไหลของของไหลสองสถานะในไมโครเซนเนลและค่าที่แสดงผลจากโปรแกรมว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อค่าที่วัดได้แต่ละตำแหน่งเริ่มคงที่จึงทำการบันทึกข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

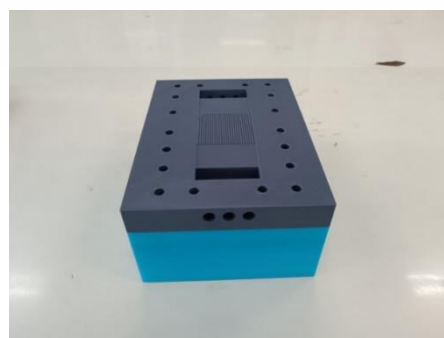


ภาพที่ 4.19 ตัวอย่างภาพลักษณะการไหลที่เกิดขึ้น

จากการสังเกตพบว่ารูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นมีการไหลของอากาศไม่ทั่วถึงทุกช่องของไมโครเซนเนล โดยส่วนมากไหลผ่านช่องที่อยู่บริเวณกึ่งกลางช่องบริเวณริมมีอากาศไหลผ่านเพียงเล็กน้อย

4.5 สร้างต้นแบบชุดทดลองใหม่

1. ศึกษารูปแบบทางเข้าของไมโครเซนเนลในการไหลสองสถานะ
2. ออกแบบรูปแบบทางเข้าที่ต้องการปรับปรุงจากชุดทดลองเดิมโดยใช้โปรแกรม AutoCAD ในการออกแบบ และใช้โปรแกรม Ultimaker Cura เพื่อสร้าง G-Code เพื่อนำไปใช้กับเครื่องปริ้นต์ 3 มิติ
3. สร้างโมเดลต้นแบบด้วยเครื่องปริ้นต์ 3 มิติ โดยมีทางเข้า 3 ทาง และมีช่องสำหรับให้อากาศเข้าจากด้านข้างบริเวณ mixing chamber เพิ่มปริมาตรของ mixing chamber ให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ให้อากาศผสมกับน้ำได้ดีขึ้นก่อนเข้าไมโครเซนเนล

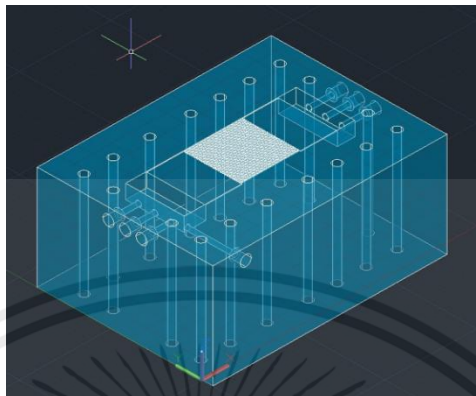


ภาพที่ 4.20 โมเดลต้นแบบจากเครื่องปริ้นต์ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 รายละเอียดต้นแบบชุดทดลองใหม่

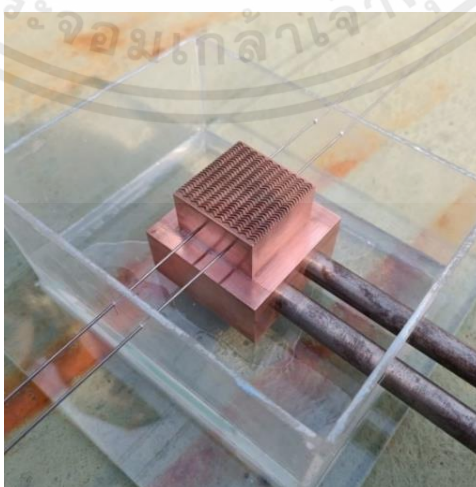
โดยรูปแบบทางเข้าที่ออกแบบใหม่สามารถใช้รูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะได้สองแบบ ดังนี้



ภาพที่ 4.21 ต้นแบบชุดทดลองปรับปรุงใหม่ที่สร้างในโปรแกรม AutoCAD

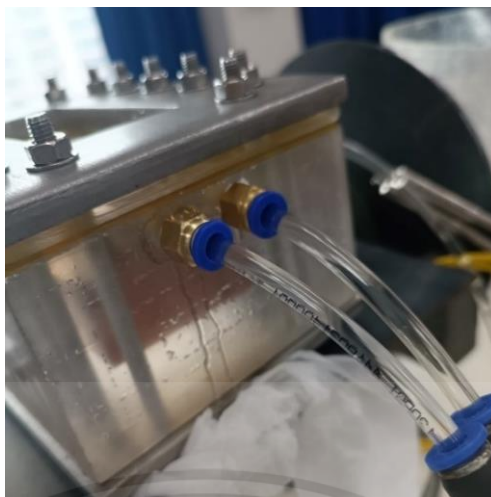
1. เชื่อมท่ออากาศและน้ำให้ผสมกันด้วยตัวเชื่อมและแบ่งเข้า 3 ทางเข้าที่เรียงตัวกันในแนวระนาบตามขนาดความกว้างของไมโครเซนเนล ก่อนเข้า mixing chamber และเข้าสู่ไมโครเซนเนล
2. ปิดช่องทางเข้า 2 ช่อง ใช้ช่องทางเข้าเดียวเป็นทางเข้าของน้ำ และอากาศเข้ามาผสมจากท่อด้านข้างบริเวณ mixing chamber และเข้าสู่ไมโครเซนเนล

4.7 สร้างชุดทดลองเพื่อนำมาใช้จริง



ภาพที่ 4.22 ภาพขณะทำการหล่อเรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

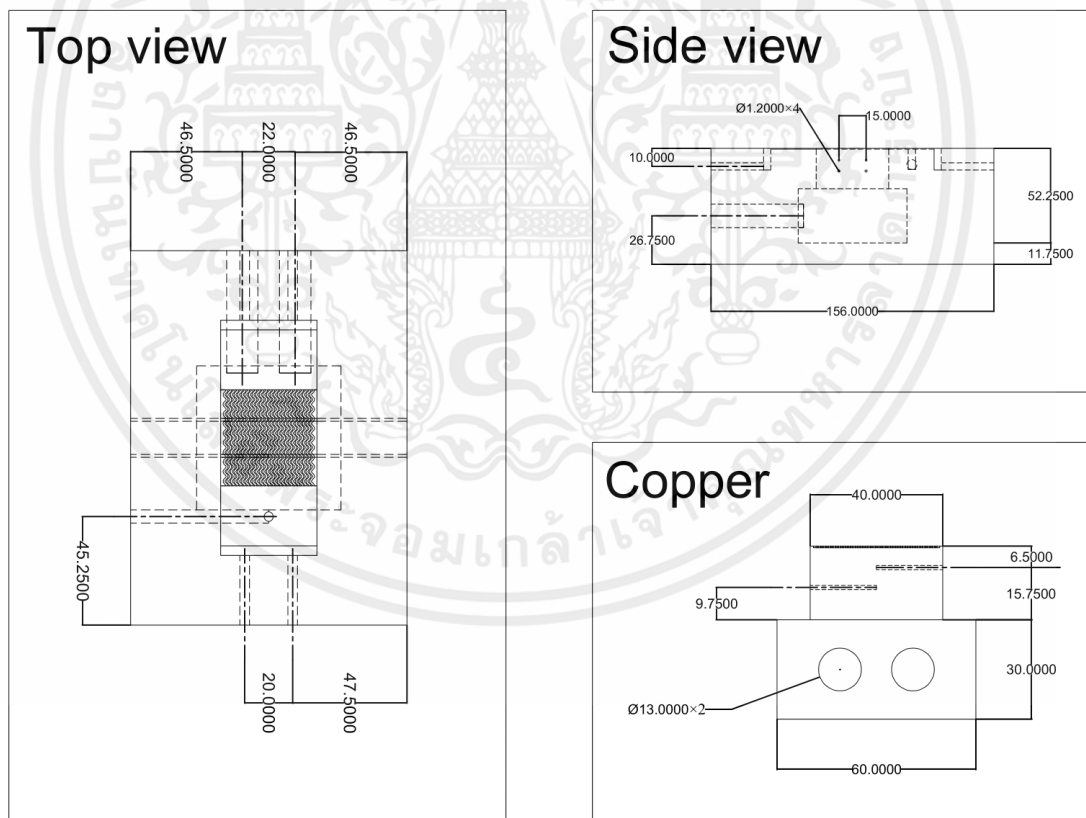
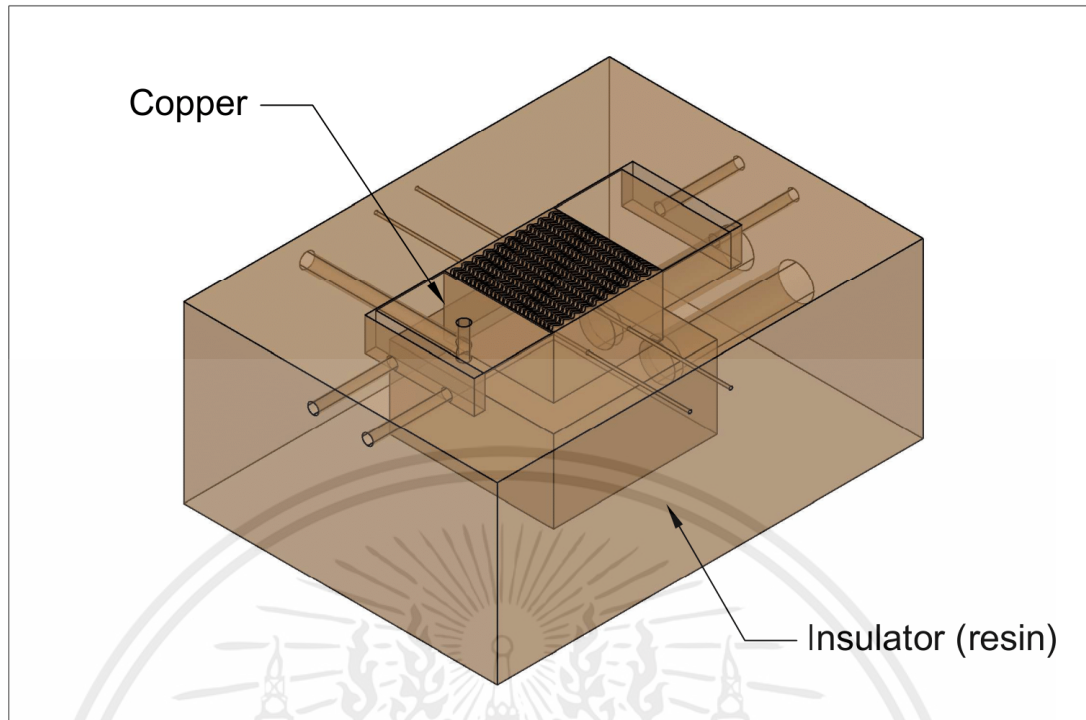


ภาพที่ 4.23 ภาพขณะทำการทดสอบชุดทดลอง

1. สั่งกัดและเจาะทองแดงตามขนาดที่ออกแบบไว้
2. วัดและตัดแผ่นอะคริลิกและกระจกตามขนาดที่ออกแบบเพื่อนำมาสร้างแม่พิมพ์ในการหล่อเรซินโดยการเจาะรูสำหรับใส่ลวดและแท่งเหล็กเพื่อหล่อเป็นช่องสำหรับเทอร์โมคัปเปิลและคาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ตามลำดับ
3. ประกอบแม่พิมพ์เข้าด้วยกันโดยใช้ซิลิโคนในการยึดติดและทำการหล่อเรซิน
4. ตัดแผ่นยางสำหรับใช้อัดอะคริลิกเพื่อปิดด้านบนของไมโครแซนเนล และแผ่นสแตนเลส จากนั้นเจาะรูและทำเกลียวสำหรับใส่สลักเกลียวและเชื่อมต่อลมเกลียวนอก
5. ทดลองเปิดปั้มน้ำและลม จากนั้นแก้ไขจุดที่เกิดการรั่วไหล

4.8 รายละเอียดของชุดทดลองใหม่

ชุดทดลองจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนไมโครแซนเนลทองแดง และส่วนของฉนวนอีพอกซีเรซิน ซึ่งฉนวนเรซินจะมีการออกแบบให้มีช่องทางเข้าและออกไมโครแซนเนลของของไหลช่องของฮีตเตอร์ รวมไปถึงส่วนที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ (เทอร์โมคัปเปิล) และส่วนวัดความดัน (ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน) นอกจากนี้ในการออกแบบนี้มีการเปลี่ยนช่องทางไหลเข้าจากสามทางเป็นสองทางเนื่องจากให้ผลที่เหมือนกันจึงเลือกใช้เป็นแบบสองทาง



ภาพที่ 4.24 รายละเอียดของชุดทดลองใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ค่าที่ใช้ในการทดลอง

4.9.1 การทดลองรูปแบบการไหล

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำและอากาศ โดยสามารถปรับอัตราไหลของแต่ละสถานะได้จากโรตاميเตอร์ และทำการถ่ายภาพการไหลใน ทุกคู่อันดับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำและอากาศ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองรูปแบบการไหล

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
Water flow rate (cm ³ /min)	100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300
J _{SL} (m/s)	0.13, 0.17, 0.20, 0.23, 0.27, 0.30, 0.33
Air flow rate (l/min)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 14, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5
J _{SG} (m/s)	0.13, 0.27, 0.40, 0.53, 0.66, 0.80, 0.93, 1.06, 1.19, 1.33, 1.46, 1.59, 1.72, 1.86, 1.99, 2.12, 2.26, 2.39, 2.52, 2.65, 2.79, 2.92, 3.05, 3.18, 3.31

4.9.2 การทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำและอากาศ และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของไหลของน้ำและอากาศ ปรับอัตราไหลของแต่ละสถานะได้จากโรตاميเตอร์แบบเดียวกับการทดลองรูปแบบการไหล ค่าของอัตราการให้พลังงานความร้อนซึ่งคำนวณจากอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของของไหลและสามารถปรับได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้ฮีตเตอร์

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อน

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ทดลอง
AC Power (watt)	14 watt
Water flow rate (cm ³ /min)	100, 150, 175, 200, 300, 400
Air flow rate (l/min)	0.5, 0.6, 1, 2, 2.5
Re_{SL}	95.86, 287.59, 383.45, 119.83, 239.66, 263.62
Re_{SG}	26.13, 31.36, 52.26, 104.53, 130.66

4.10 ขั้นตอนการทดลอง

1. เติมน้ำใส่แทงค์น้ำ และเปิดปั๊มลมให้ถึงเก็บลมถึงค่าความดันไม่เกินกว่า 7 บาร์ ซึ่งเป็นค่าความดันสูงสุดตามข้อกำหนดของเครื่อง
2. เปิดปั๊มน้ำ, วาล์วปั๊มลม, อุปกรณ์วัดความดันและเครื่อง data logger โดยในการทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนต้องเปิดฮีตเตอร์ในขั้นตอนนี้
3. เชื่อมต่อเครื่อง data logger กับคอมพิวเตอร์ และเปิดโปรแกรมที่ใช้แสดงผลและเก็บผล
4. ทำการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำและอากาศตามค่าที่กำหนดในตาราง
5. ขั้นตอนสุดท้ายทำการบันทึกผลการทดลองลงคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมหรือทำการถ่ายรูปการไหลในไมโครเซนเนลตามแต่ละอัตราการไหลที่เลือก

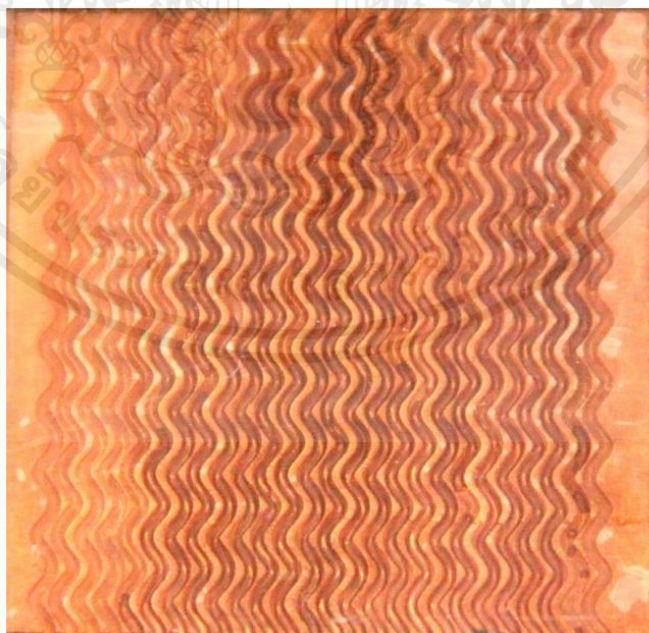
บทที่ 5

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของสองสถานะ (อากาศ-น้ำ) ในไมโครแชนเนลรูปคลื่นพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยทำการทดลองในอัตราการไหลของน้ำทั้งหมด 10 ค่า คือ 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275 และ 300 CCM พร้อมกับทดลองอากาศในอัตราการไหลทั้งหมด 5 ค่า ตั้งแต่ 0.1 ถึง 2.5 LPM โดยในการทดลองนี้จะให้ฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิววงที่ตามแนวแกน 28 W เพื่อหาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและความดันตกมาเปรียบเทียบระหว่างการไหลของไหลสถานะเดียวกับของไหลสองสถานะ รวมถึงการสังเกตรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในการไหลสองสถานะเพื่อนำไปสร้างแผนที่รูปแบบการไหล

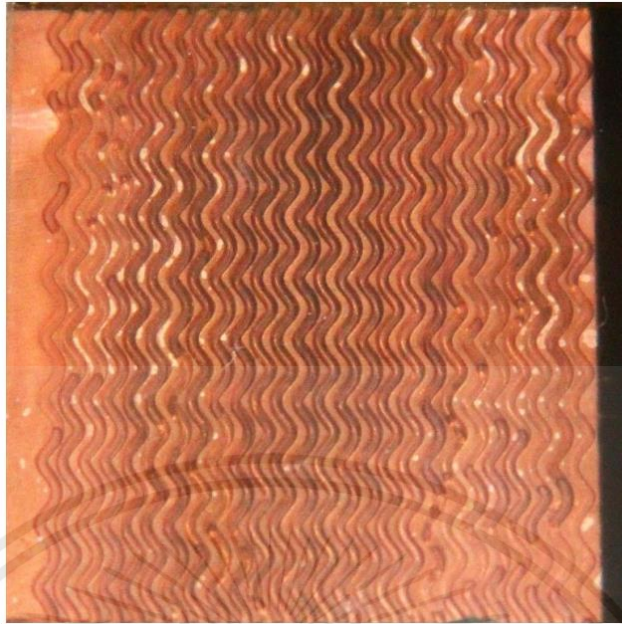
5.1 การกระจายตัวของการไหลในสองสถานะของชุดทดลองเดิม

การแสดงผลการกระจายตัวของการไหลในชุดทดลองที่ไม่มีการปรับปรุงทางเข้าใหม่ โดยทดสอบที่อัตราการไหล ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งผลที่ได้คือการไหลไม่สามารถไหลในไมโครแชนเนลได้ครบทุกช่อง

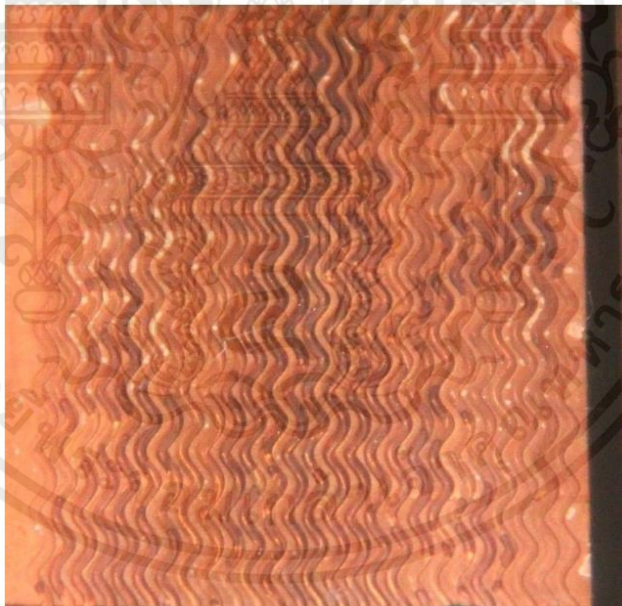


ภาพที่ 5.1 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

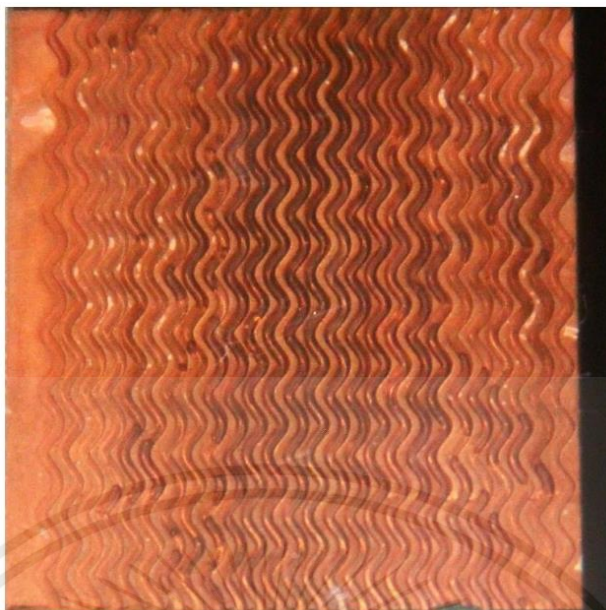


ภาพที่ 5.2 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM



ภาพที่ 5.3 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.4 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM

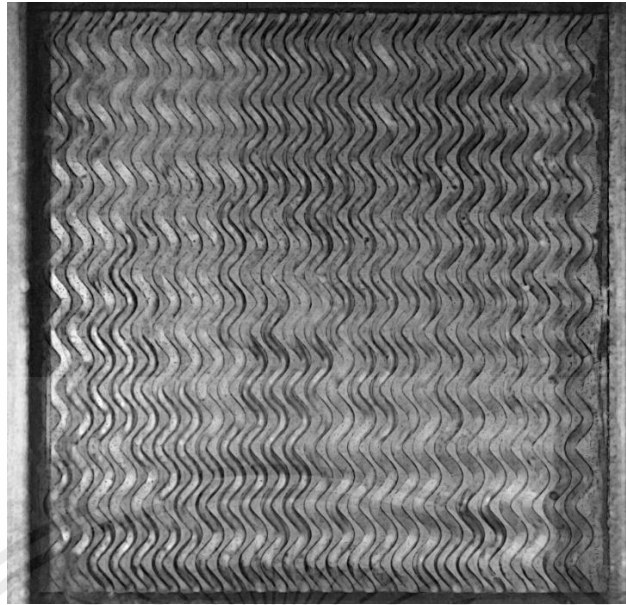


ภาพที่ 5.5 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM

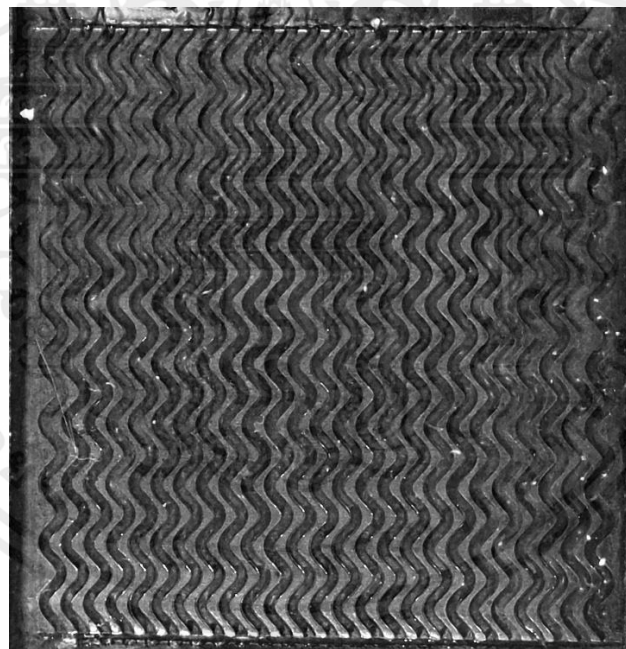
5.2 การกระจายตัวของการไหลในสองสถานะของชุดทดลองใหม่

การแสดงผลของการกระจายตัวของการไหลในทางเข้าแบบคู่ โดยทดสอบที่อัตราการไหล ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งทางเข้าแบบคู่สามารถกระจายการไหลให้สามารถเข้าไมโครเซนเนลได้ครบทั้ง 25 ช่อง ดังภาพที่ 5.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

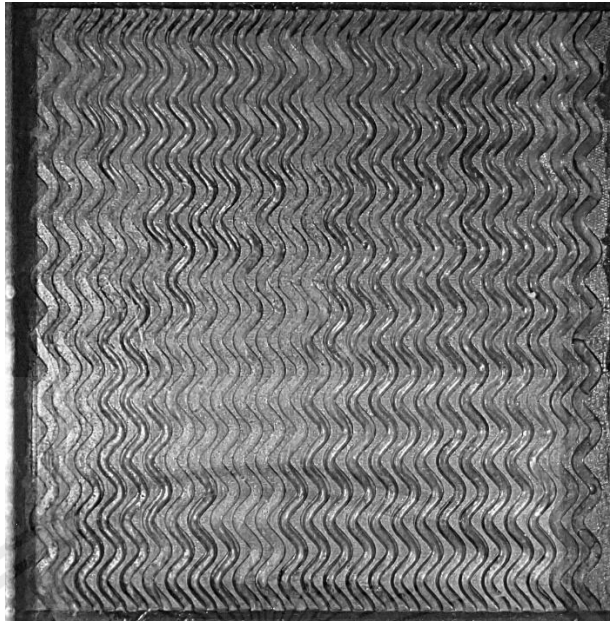


ภาพที่ 5.6 ภาพแสดงการกระจายการไหลในไมโครแซนเนล

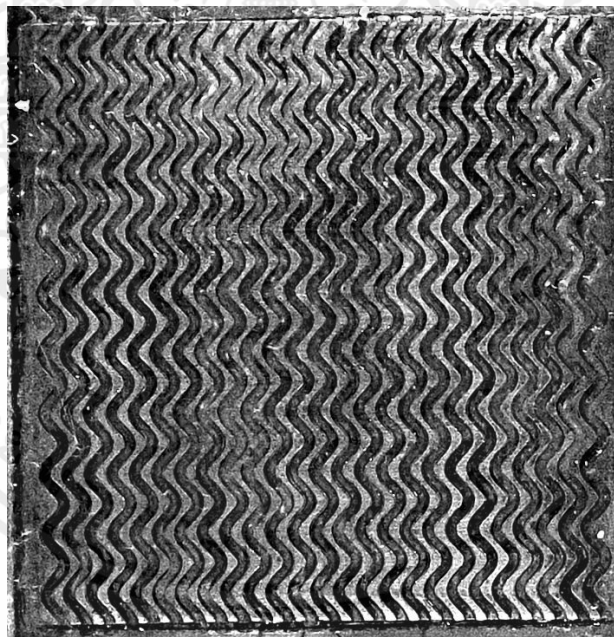


ภาพที่ 5.7 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 100 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

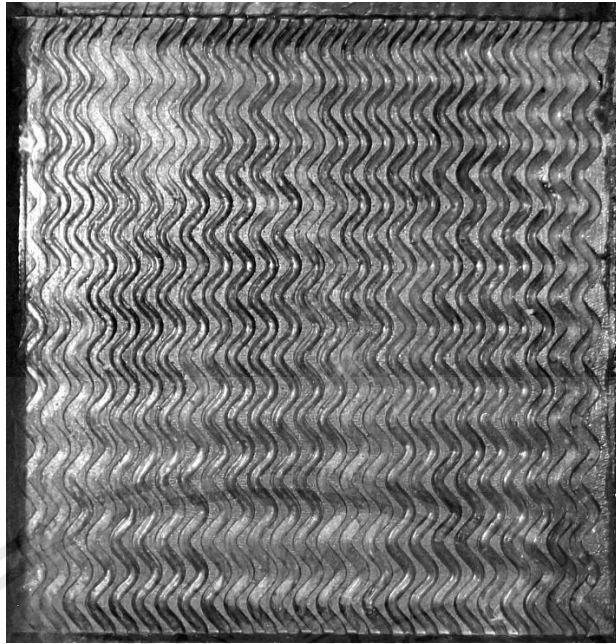


ภาพที่ 5.8 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 150 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM

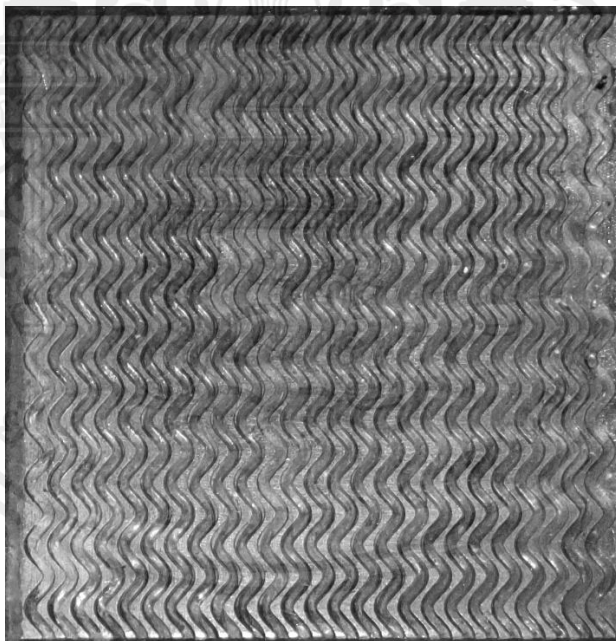


ภาพที่ 5.9 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 200 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.10 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 250 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM



ภาพที่ 5.11 การไหลที่อัตราการไหลของน้ำ 300 CCM และอัตราไหลของอากาศ 1 LPM

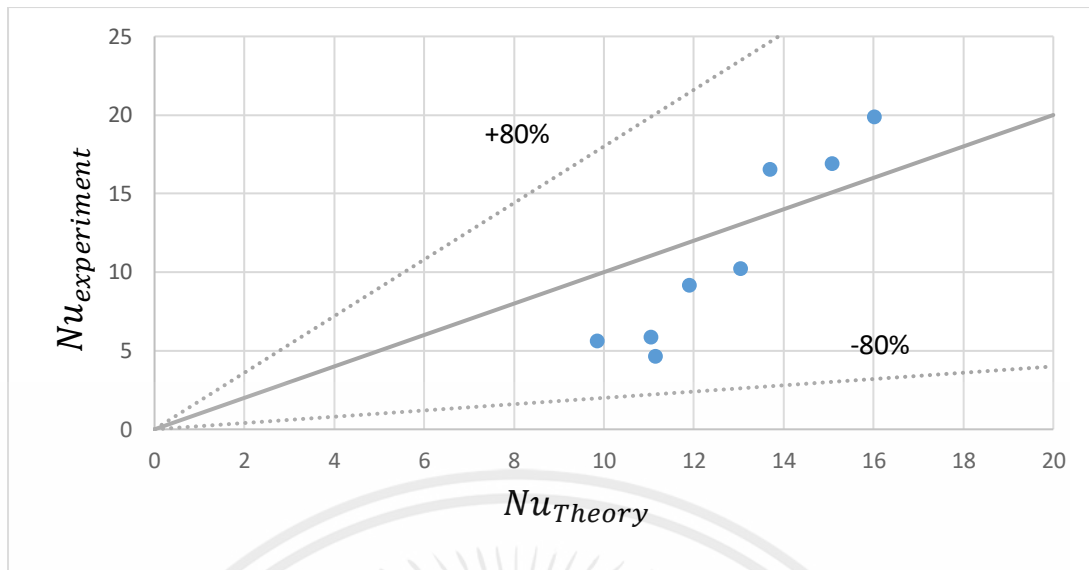
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง ทำเพื่อทดสอบความถูกต้องของชุดทดลองว่า มีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายตัวเลขนัสเซลล์ท์ว่ามีความแตกต่างมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะทำการตรวจสอบกับการไหลของของไหลสถานะเดียว และทำการตรวจสอบการไหลของของไหลสองสถานะใช้สหสัมพันธ์

5.3.1 การตรวจสอบการไหลของของไหลสองสถานะการตรวจสอบในไมโครแชนเนลคลื่น

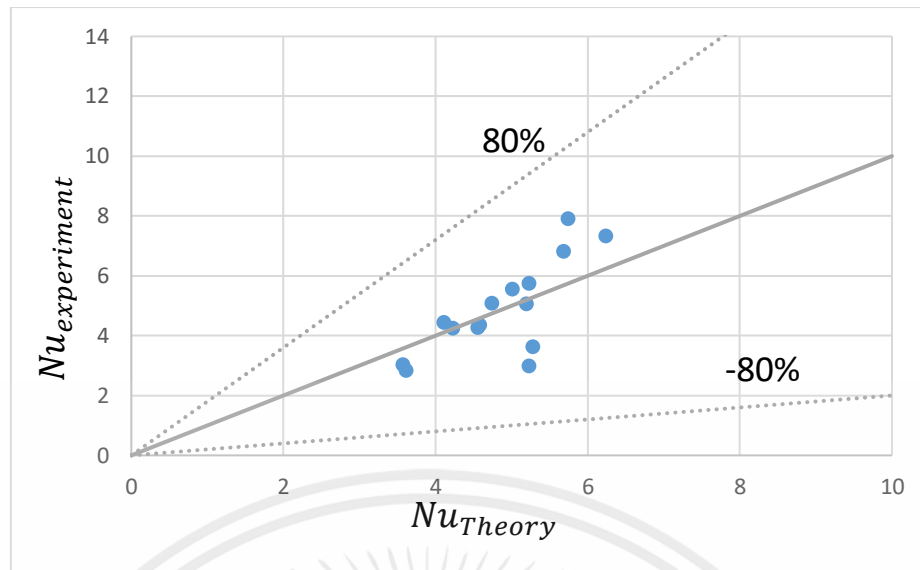
การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลของของไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคลื่น สามารถทำนายค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์สามารถหาได้จากสมการสหสัมพันธ์ของ Kalb และ Sheader ไว้ดังสมการที่ (3.16) ในขั้นตอนแรก ได้ทำการคำนวณค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์จากการใช้เลขเรย์โนลด์สองสถานะตามที่คำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำและอากาศ พบว่าสามารถคำนวณค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์ของไหลสองสถานะ ได้ในช่วงระหว่าง 80.62 – 355.65 และคำนวณค่าตัวเลขพรันเทิลด์ของของไหลสองสถานะออกมาได้ในช่วง 1.6 – 3.68 จึงสามารถใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb และ Sheader [26] ได้ โดยทำการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์ที่ได้จากการทดลองและค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์ที่ได้จากการคำนวณและนำมาพล็อตกราฟ ดังรูป 5.1 พบว่าในการไหลสองสถานะอากาศ – น้ำ มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 26.6% โดยความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลองเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัยด้วยกัน ปัจจัยที่หนึ่งคือ อัตราการไหลของน้ำและอากาศไหลไม่คงที่ตลอดช่วงการทดลอง ลูกลอยในโรตاميเตอร์เกิดการส่ายขึ้นลง เนื่องจากโรตاميเตอร์มีอายุการใช้งานค่อนข้างมาก ทำให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างพอสมควร ปัจจัยที่สองคือ ค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องวัดและบันทึกสัญญาณไม่ใช่ค่าอุณหภูมิที่คงที่เสมอ เกิดความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่อุณหภูมิขาเข้า อุณหภูมิขาออก และอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนทองแดง ปัจจัยที่สามคือ ฮีตเตอร์แบ่งจ่ายความร้อนจ่ายไม่คงที่ เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายกำลังไฟฟ้าที่เปลี่ยนจากไฟฟ้ากระแสสลับมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงไม่คงที่ ซึ่งก่อนปรับค่ากระแสและความต่างศักย์มีค่าไม่นิ่งตามการใช้ไฟฟ้าของอาคาร ทำให้ฟลักซ์ความร้อนที่จ่ายเข้าสู่ชุดทดลองมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นปัจจัยสุดท้ายคือ ในทางทฤษฎีที่ระบบจะเกิดขึ้นในระบบที่เป็นไอเซนโทรปิก แต่ในความเป็นจริงแล้วในการทดลองไม่ได้เป็นระบบไอเซนโทรปิก ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ดังที่ กล่าวมาทั้งหมด ส่งผลให้ค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์จากการทดลองเมื่อเทียบกับค่าตัวเลขนัสเซลล์ท์ทางทฤษฎีเกิดความคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 5.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของของไหลสองสถานะในท่อคลื่นที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Kalb และ Sheader [26]

5.3.2 การตรวจสอบการไหลของของไหลสองสถานะในการตรวจสอบในไมโครแชนเนลรูปตรง

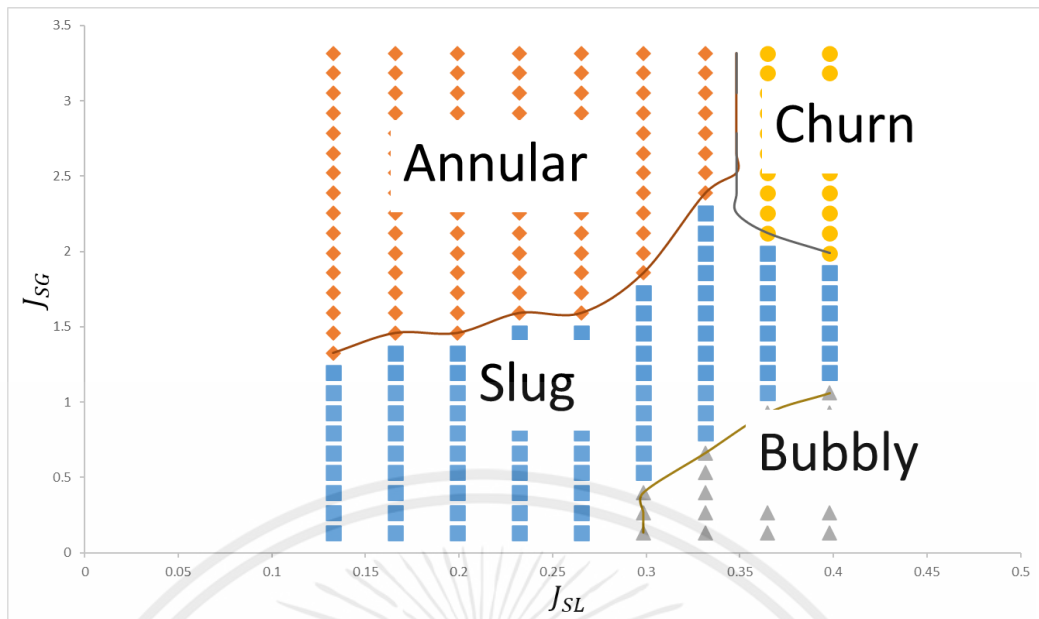
การตรวจสอบความถูกต้องของการไหลของของไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคลื่นสามารถทำนายค่าตัวเลขนัสเซิลท์สามารถหาได้จากสมการสหสัมพันธ์ของ Chuanshuai Dong และ Takashi Hibiki [24] ในขั้นตอนแรก ได้ทำการคำนวณค่าตัวเลขดิน จากการใช้เลขเรย์โนลด์สองสถานะตามที่คำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำและอากาศ พบว่าสามารถคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสองสถานะ ได้ในช่วงระหว่าง 80.62 – 355.65 และคำนวณค่าตัวเลขพรีนเทิลด์ของของไหลสองสถานะออกมาได้ในช่วง 1.6 – 3.68 จึงสามารถใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Chuanshuai Dong และ Takashi Hibiki [24] ได้ โดยทำการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการทดลองและค่าตัวเลขนัสเซิลท์ที่ได้จากการคำนวณและนำมาพล็อตกราฟ ดังรูป 5.2 พบว่าในการไหลสองสถานะ อากาศ – น้ำ มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) เท่ากับ 15.8%



ภาพที่ 5.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลท์ของของไหลสองสถานะในท่อตรงที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการสหสัมพันธ์ของ Chuanshuai Dong และ Takashi Hibiki [24]

5.4 รูปแบบการไหล

จากการทดลองจะพบว่ารูปแบบการไหลที่พบเจอในไมโครแชนเนลรูปคลื่นที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมี Bubbly flow, Churn flow และ Annular flow ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟ Flow Pattern Map ได้ดังรูป พบว่าจะเกิดการไหลแบบ Slug ที่ J_{SL} เท่ากับ 0.13 – 0.53 m/s ที่ J_{SG} เท่ากับ 0.13 – 0.22 m/s จะเกิดการไหลแบบ Bubbly ที่ J_{SL} เท่ากับ 0.3 – 0.53 m/s ที่ J_{SG} เท่ากับ 0.13 – 1.19 m/s จะเกิดการไหลแบบ Churn flow ที่ J_{SL} เท่ากับ 0.36 – 0.53 m/s ที่ J_{SG} เท่ากับ 1.86 – 3.32 m/s จะเกิดการไหลแบบ Annular ที่ J_{SL} เท่ากับ 0.13 – 0.33 m/s ที่ J_{SG} เท่ากับที่ 1.33 – 3.32 m/s



ภาพที่ 5.14 แสดงแผนที่รูปแบบการไหลของสองสถานะในไมโครแชนเนล

1. Slug flow

รูปแบบการไหลแบบ Slug flow จะมีฟองอากาศเป็นแนวยาวหรือสั้นคั่นพื้นที่ในส่วนที่เป็นน้ำ ซึ่งจะคั่นอยู่บริเวณด้านบนของท่อ

2. Bubbly flow

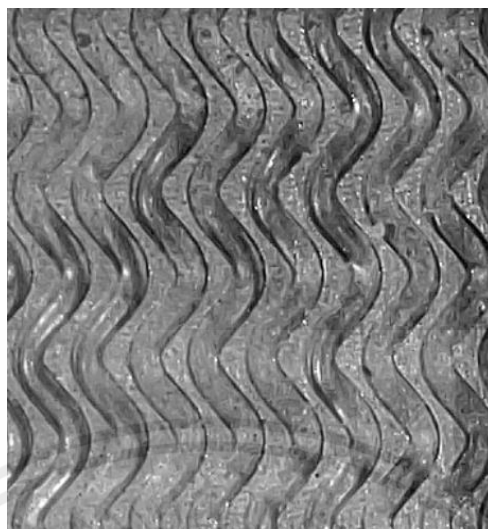
รูปแบบการไหลแบบ Bubbly flow จะเห็นว่ามีฟองอากาศจำนวนมากไหลอยู่ในช่องที่เป็นพื้นที่ของน้ำ โดยรูปแบบการไหลนี้จะเกิดเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำที่สูงแต่มีอัตราการไหลของอากาศที่น้อย

3. Annular flow

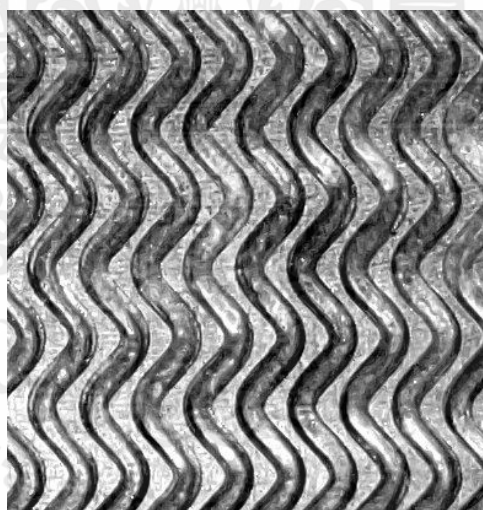
รูปแบบการไหลแบบ Annular flow จะเป็นรูปแบบที่เกิดในกรณีที่มีอัตราการไหลของอากาศสูงในช่องมาแทนที่น้ำในช่วงกลางของช่องและมีน้ำอยู่ที่บริเวณขอบของช่องทางการไหล

4. Churn flow

รูปแบบการไหลแบบ Churn flow คือรูปแบบการไหลที่มีอากาศและน้ำในอัตราการไหลที่สูงทำให้เกิดความปั่นป่วนในช่องทางการไหล และมองเห็นเป็นลักษณะชุนมัว

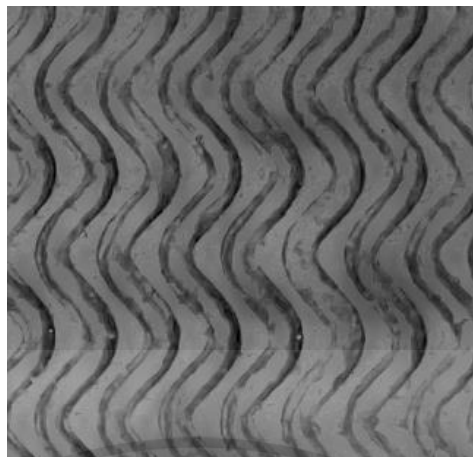


ภาพที่ 5.15 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างการไหลแบบ Slug flow
ที่ $J_{SL} = 0.17 \text{ m/s}$ และ $J_{SG} = 0.66 \text{ m/s}$



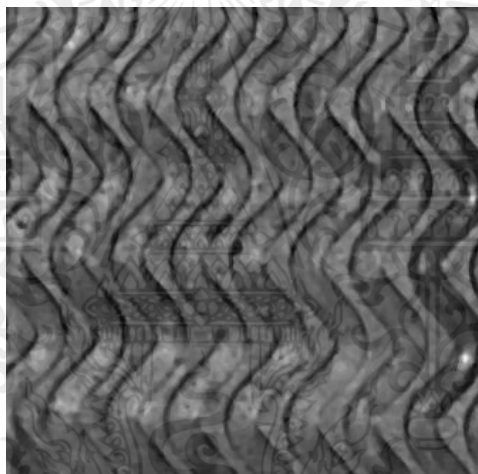
ภาพที่ 5.16 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างการไหลแบบ Churn flow
ที่ $J_{SL} = 0.33 \text{ m/s}$ และ $J_{SG} = 0.80 \text{ m/s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.17 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างการไหลแบบ Annular flow

ที่ $J_{SL} = 0.23 \text{ m/s}$ และ $J_{SG} = 1.99 \text{ m/s}$



ภาพที่ 5.18 ภาพถ่ายแสดงตัวอย่างการไหลแบบ Bubbly flow

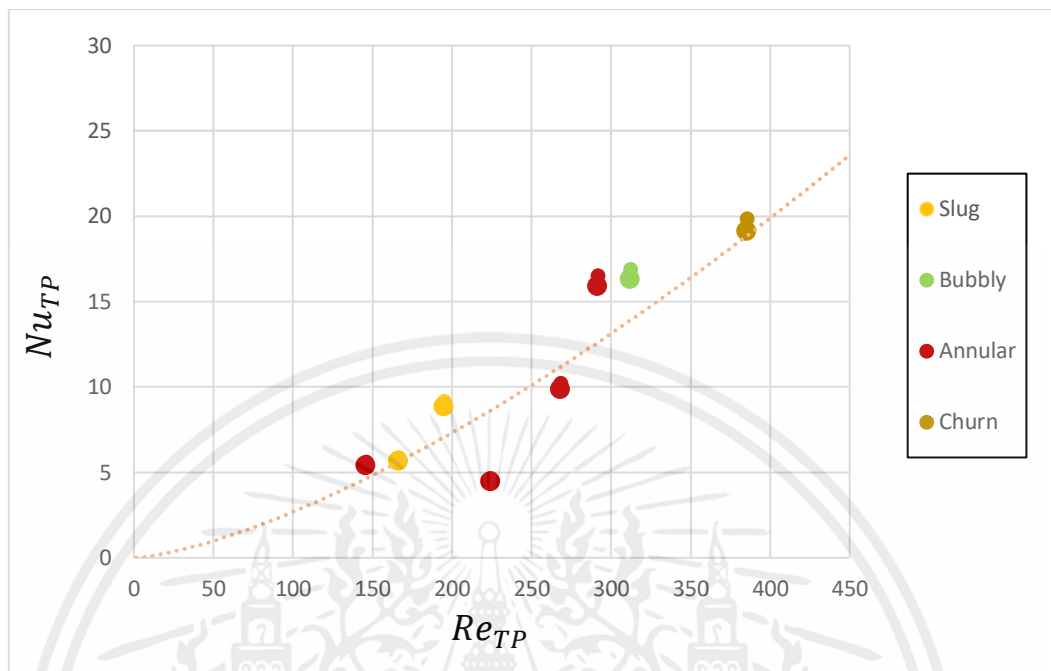
ที่ $J_{SL} = 0.3 \text{ m/s}$ และ $J_{SG} = 0.27 \text{ m/s}$

5.5 การถ่ายเทความร้อนและความดันตกของการไหลแบบสองสถานะ

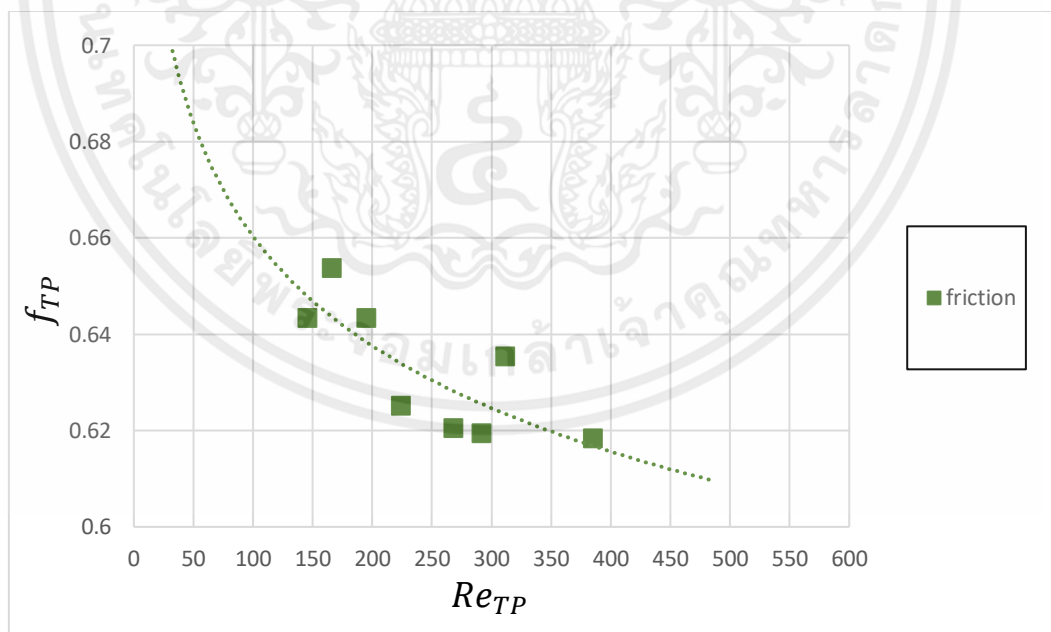
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลองการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนและความดันตกโดยแสดงค่าเป็นตัวแปรของตัวเลขนัสเซิลท์และแฟกเตอร์ความเสียหายของการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคลื่นและรูปตรงที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามลำดับ โดยกำหนดอัตราการไหลของน้ำไปตามแต่ละลำดับเป็นไปตามตารางที่ 4.2 โดยตัวเลขนัสเซิลท์ของการไหลสองสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.9) – (3.15) โดยทำการทดลองตามอัตราการไหลของน้ำและอากาศตามตาราง ดังนี้

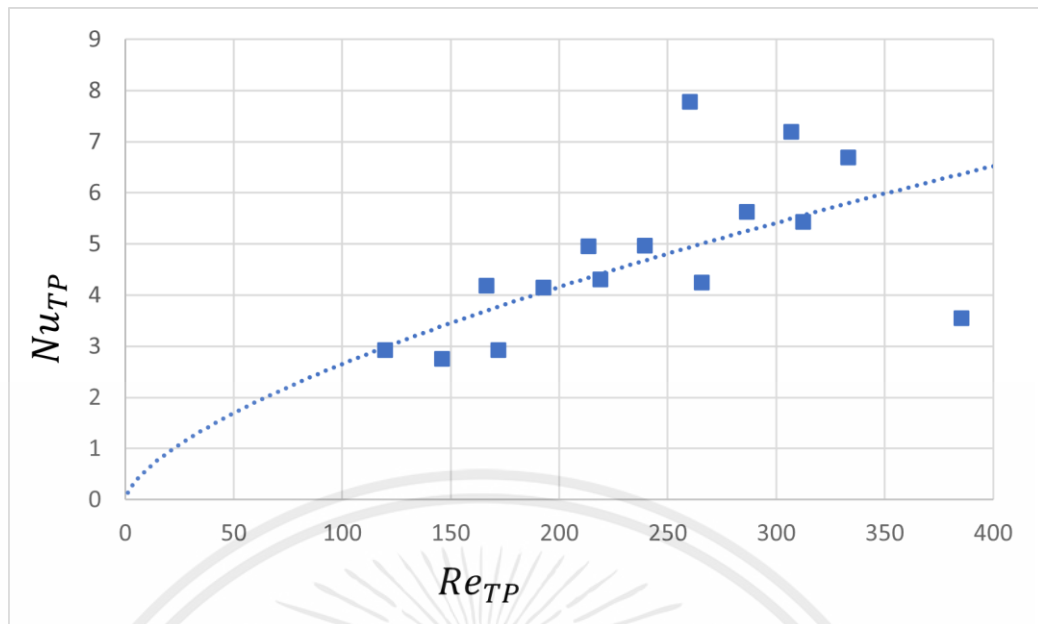


ภาพที่ 5.19 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในไมโครแชนเนลคลื่น

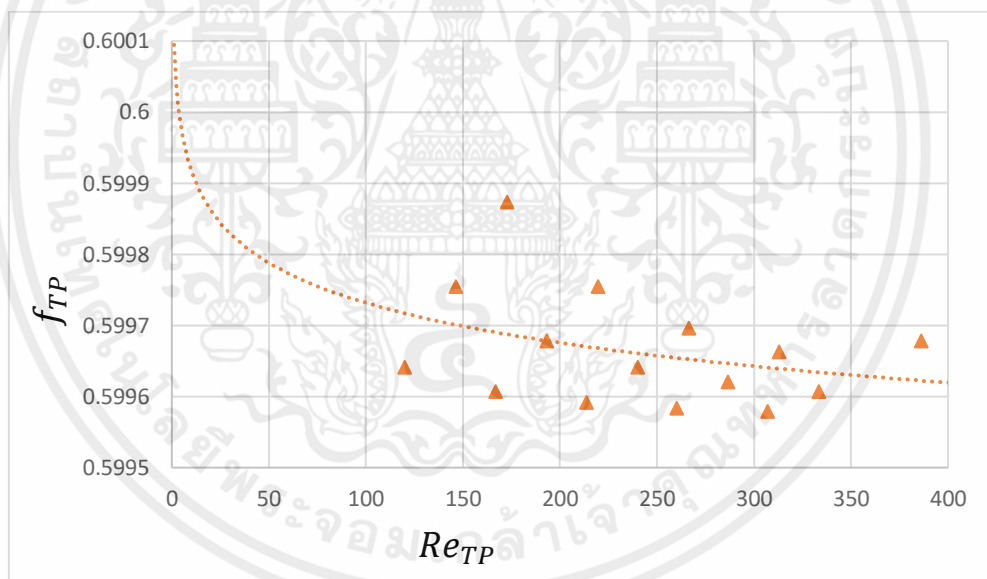


ภาพที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์ความเสียดทานกับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.21 กราฟแสดงการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบสองสถานะในท่อตรง



ภาพที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแฟกเตอร์ความเสียดทานกับตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปตรง

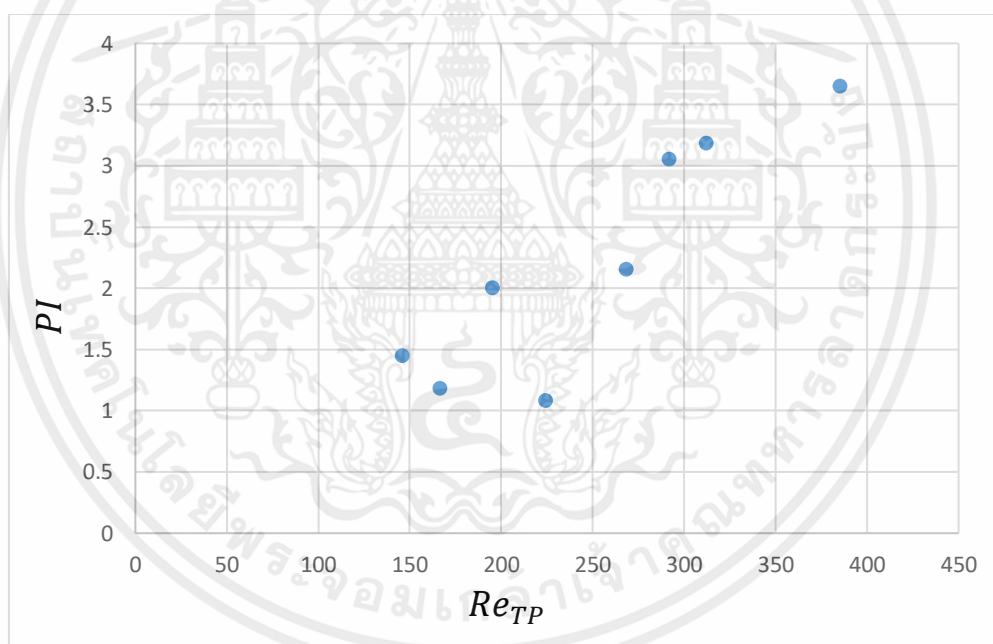
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าตัวเลขนัสเซลท์ในไมโครแชนเนลรูปคลื่นมีค่ามากกว่าตัวเลขนัสเซลท์ในไมโครแชนเนลรูปตรง ซึ่งหมายถึงในไมโครแชนเนลรูปคลื่นมีการถ่ายเทความร้อนมากกว่าไมโครแชนเนลรูปตรง แต่ในส่วนของแฟกเตอร์ความเสียดทานในไมโครแชนเนลรูปคลื่นมีค่ามากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในไมโครแซนเนลรูปตรง ซึ่งหมายความว่าไมโครแซนเนลรูปคลื่นมีความดันลดที่มากกว่าไมโครแซนเนลรูปตรง

5.6 สมรรถนะของการถ่ายเทความร้อน (Performance Index, PI)

จากการศึกษาทดลองการไหลของของไหลสองสถานะในไมโครแซนเนลรูปคลื่น พบว่าค่าตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะแปรผันตรงกับแฟกเตอร์ความเสียดทานที่คำนวณจากค่าความดันลดที่วัดได้ ดังนั้นในการเลือกช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง Colaco และคณะ [28] ได้เสนอสมการที่ใช้ในการหาค่าสมรรถนะของการถ่ายเทความร้อนไว้ดังสมการที่ (3.24) อธิบายให้เห็นถึงการเปรียบเทียบผลของการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของค่าการถ่ายเทความร้อนเป็นตัวเลขนัทเชิลท์ต่อการเพิ่มขึ้นของแฟกเตอร์ความเสียดทานที่เป็นอัตราส่วนเช่นกัน



ภาพที่ 5.23 กราฟแสดงสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน
ภายในไมโครแซนเนลของของไหลสองสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนและศึกษารูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะ(อากาศและน้ำ) ภายในไมโครแชนเนลรูปคลื่นที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาดพื้นที่หน้าตัดกว้าง 0.8 มิลลิเมตร ความลึก 0.5 มิลลิเมตร ความกว้างของครีบ 0.5 มิลลิเมตร แอมพลิจูด 0.62 มิลลิเมตร ความยาวในแนวทอตรง 40 มิลลิเมตร จำนวนทอทั้งหมด 25 ทอ โดยทำการทดลองผลของการถ่ายเทความร้อนในไมโครแชนเนลกับรูปแบบการไหลในไมโครแชนเนล เพื่อเปรียบเทียบว่ารูปแบบการไหลใดมีผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด ในสภาวะที่ไม่มีการเดือด และพลั๊กความร้อนจ่ายคงที่ ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำในช่วง 100 ถึง 400 CCM และอัตราการไหลของอากาศในช่วง 0.1 ถึง 2.5 LPM สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการทดลองสรุปได้ว่าการออกแบบรูปร่างแบบทางเข้าแบบคู้ทำให้เกิดการกระจายตัวของการไหลที่มากขึ้นส่งผลให้ของไหลสามารถไหลในไมโครแชนเนลได้ทุกช่อง
2. ในการศึกษาการไหลในไมโครแชนเนลรูปคลื่น โดยแสดงเป็นความเร็วผิวของน้ำและความเร็วผิวของอากาศ พบว่าเกิดรูปแบบการไหลเป็น Slug, Bubbly, Annular และ Churn flow
3. ในการทดลองการถ่ายเทความร้อนของไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคลื่น โดยแสดงเป็นตัวเลขเรย์โนลด์สองสถานะและตัวเลขนัสเซลท์ พบว่าตัวเลขนัสเซลท์แปรผันตามเลขเรย์โนลด์สองสถานะ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการพาความร้อนแบบบังคับ
4. จากการศึกษาดทดลองเรื่องความดันลดของการไหลสองสถานะในไมโครแชนเนลรูปคลื่น พบว่าความดันลดที่วัดได้จากตัวแปลงสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้นตามตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสองสถานะที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำค่าความดันลดที่วัดได้มาคำนวณให้อยู่ในรูปแฟกเตอร์ความเสียหาย พบว่ามีแนวโน้มแปรผกผันกับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสองสถานะ
5. ค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของของไหลสองสถานะ โดยรูปแบบการไหลที่ทำให้เกิดสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุดคือ Churn flow

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการสอบเทียบวัดเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง เช่น โรตารีมิเตอร์ที่ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำและอากาศในท่อไมโครแชนเนล ให้มีความแม่นยำเพื่อให้ผลการทดลองที่ตรงตามทฤษฎี
2. ควรมีอุปกรณ์บันทึกภาพที่คมชัดกว่านี้และมีความไวซีตเตอร์ที่เพียงพอ เพื่อจะทำให้ได้เห็นรูปแบบการไหลของของไหลสองสถานะที่ชัดเจนยิ่งขึ้นกว่านี้
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับรูปแบบการไหล เมื่อไมโครแชนเนลทำมาจากวัสดุต่างๆ เช่น เงิน ทองเหลือง เหล็ก อลูมิเนียม เป็นต้น
4. ควรศึกษารูปแบบการไหลสำหรับการใช้ของไหลทำงานประเภทอื่น เช่น สารทำความเย็นชนิดต่างๆ หรือของไหลนาโน เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Yi Sui, Chiang Juay Teo, Poh Seng Lee, Yongtian Chew, Chang Shu, (2010). **Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels**, Mechanical Eng., National University of Singapore, Singapore, Int. J. of Heat and Mass Transf. Vol. 53, pp. 2760-2772.
- [2] Wilfried Roetzel , Xing Luo , Dezhen Chen, (2020). **Design and Operation of Heat Exchangers and their Networks**, pp. 149-189.
- [3] L. Hernandez, J. E. Julia, S. Chiva, S. Paranjape and M. Ishii, (2006). **Fast classification of two-phase flow regimes based on conductivity signals and artificial neural networks**. Vol. 17(6), pp. 1511-1518.
- [4] Weilin Qu, (2004). **Two-Phase Flow and Heat Transfer in Rectangular Micro-Channels**. Purdue University International Electronic Cooling Alliance (PUIECA), Vol. 126, pp. 288-300.
- [5] Triplett, Mostafa Ghiaasiaan, Said Abdel-Khalik, Dennis Sadowski, (1999). **Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part I: two-phase flow patterns, International**. Journal of Multiphase Flow, Vol. 25, pp. 377-394.
- [6] Michiel Kreutzer, Freek Kapteijn, Jacob Moulijn, Johan Heiszwolf, (2005). **Multiphase monolith reactors: Chemical reaction engineering of segmented flow in microchannels**. Chemical Engineering Science, Vol. 60, pp. 5895-5916.
- [7] Reiyu Chein, Janghwa Chen, (2009). **Numerical study of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance**. International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48(8), pp. 1627-1638.
- [8] Aritra Sur, Dong Lui, (2012). **Adiabatic air-water two-phase flow in circular microchannels**. International Journal of Thermal Sciences, Vol. 53, pp. 18-34.
- [9] Lei Wang, Shenghua Ma, Xuejing Wang, Hongmei Bi, Xiaojun Han, (2014). **Mixing enhancement of a passive microfluidic mixer containing triangle baffles**. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, Vol. 9(6), pp.877-885.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Kyosung Choo, Sung Jin Kim, (2011). **Heat transfer characteristics of nonboiling two-phase flow in microchannels.** Journal of Heat Transfer, Vol. 133(10).
- [11] Mahmut Burak Okuducu, Mustafa Aral, (2019). **Novel 3-D T-Shaped Passive Micromixer Design with Helicoidal Flows.** Energies, Vol. 7(9), pp. 637.
- [12] K. Sowndarya, S. Monica, S. Abhisheka, K. Pradiskhan, M. Venkatesan, (2021). **Vane induced two phase flow mixing.** Earth and Environment Science, Vol. 850.
- [13] Amirah Mohamad Sahar, Jan Gerard Wissink, Mohamed M. Mahmoud, (2022). **Flow Distribution in Parallel Rectangular Multi Microchannels in Single Phase.** CFD Letters, Vol. 15, pp. 67-75.
- [14] Azridjal Aziz, Akio Miyara, (2012). **Distributor of two-phase flow in distributor.** Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 7(1), pp. 41-55.
- [15] Saad K. Oudah, Ruixian Fang, Amitav Tikadar, Azzam S. Salman, Jamil A. Khan, (2020). **An experimental investigation of the effect of multiple inlet restrictors on the heat transfer and pressure drop in a flow boiling microchannel heat sink.** Journal of Heat Transfer, Vol. 153, pp. 1016-1023.
- [16] Amy Rachel Betz, Daniel Attinger, (2010). **Can segmented flow enhance heat transfer in microchannel heat sinks.** International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 3683–3691.
- [17] Ashish Asthana, Igor Zinovik, Christian Weinmueller, Dimos Poulikakos, (2011). **Significant Nusselt number increase in microchannels with segmented flow of two immiscible liquids: An experimental study.** International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, pp. 1456-1464.
- [18] Kyosung Choo, Sung Jin Kim, (2011). **Heat transfer characteristics of nonboiling two-phase flow in microchannels.** Journal of Heat Transfer, Vol. 133(10).

- [19] Assel Sakanova, Jiyun Zhao, King-Jet Tseng, (2015). **Investigation on the Influence of Nanofluids in Wavy Microchannel Heat Sink**. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 5, pp. 956-970.
- [20] Nima Ghorbani, Mohammad Zabetian Targhi, Mohammad Mahdi Heyhat, Yousef Alihosseini, (2022). **Investigation of wavy microchannel ability on electronic devices cooling with the case study of choosing the most efficient microchannel pattern**. Scientific Reports, Vol.2, pp. 1199-1206.
- [21] W. H. McAdams, W. K. Woods, L. C. Heroman, (1942). **Vaporization inside Horizontal Tubes. II – Benzene - Oil Mixtures**. Trans. ASME, Vol. 64(3), pp. 193–200.
- [22] Gustavo Montoya, Dirk Lucas, Emilio Baglietto, Yixiang Liao, (2016). **A review on mechanisms and models for the churn-turbulent flow regime**. Chemical Engineering Science., Vol. 141, pp. 86-103.
- [23] Yunus A. Cengel, (2002). **Heat Transfer a Practical Approach**, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- [24] Chuanshuai Dong, Takashi Hibiki, (2018). **Heat transfer correlation for two-component two-phase slug flow in horizontal pipes**. Applied Thermal Engineering, Vol. 141, pp. 866-876.
- [25] R.C. Martinelli, R.W. Lockhart, (1949). **Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two component flow in pipes**. Chemical Engineering Progress, Vol. 45, pp. 39–48.
- [26] C. E. Kalb, J. D. Sheader, (1972). **Heat and Mass Transfer Phenomena for Viscous Flow in Curved Circular Tubes**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 15, pp. 801–817.
- [27] Philip E. Haines, James P. Denier, Andrew P. Bassom, (2013). **Dean vortices in finite-aspect-ratio ducts**. Journal of FluidMechanics, Vol. 716(8).

- [28] Andrey Barbosa Colaco, Viviana Cocco Mariani, Mohamed Reda Salem, Leandro dos Santos Coelho, (2022). **Maximizing the thermal performance index applying evolutionary multi-objective optimization approaches for double pipe heat exchanger**. Applied Thermal Engineering, Vol. 211.
- [29] Duncan Chisholm, (1983). **Two-Phase Flow in Pipeline and Heat Exchangers**, Pitman Press Ltd, Bath, England. Vol.6(2), pp. 48-57.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณหาประสิทธิภาพของครีบและเลขนัทเชิลท์

ก.1 ตัวอย่างวิธีการคำนวณประสิทธิภาพของครีบ

สมมติการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของไหลสองสถานะที่อัตราการไหลของน้ำ เท่ากับ 100 LPM และอัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 2.5 CCM โดยตัวแปรต่างๆแสดงในตาราง ดังนี้

T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	$T_{ave, fluid}$ (°C)	$T_{air, inlet}$ (°C)	T_{wall} (°C)
27.03	31.10	29.07	25.00	32.34

1. สมมติค่า $\eta_i = 1.00$

2. แทนค่าลงในสมการ

$$h = \frac{Q}{N(A_{cb} + 2A_{cs}\eta_w)(T_w - T_m)}$$

$$h = \frac{28.35}{26 \times (0.000032(m^2) + 2 \times 1 \times 0.00002(m^2)) \times ((31.38 + 273) - (29.07 + 273))}$$

$$h = 4624.98 (w/m^2 \cdot k)$$

3. แทนค่า h ลงในสมการ

$$m^2 = \frac{2h}{k_{cu} S_f}$$

$$m = \sqrt{\frac{2 \times 4625.98 (w/m^2 \cdot k)}{399.83 (w/m \cdot k) \times 0.0005 (m)}}$$

$$m = 57.49$$

4. แทนค่า m ลงในสมการ $\eta_f = \frac{\tanh(mH_f)}{mH_f}$

$$\eta_f = \frac{\tanh(57.49 \times 0.0005)}{57.49 \times 0.0005}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\eta_f = 0.999724$$

5. จะพบว่าประสิทธิภาพที่นำมาแทนในครั้งแรกมีค่าไม่เท่ากับค่าประสิทธิภาพที่ได้
 $(\eta_i \neq \eta_f)$
6. สมมติ η_i ขึ้นมาใหม่ และทำตามขั้นตอนที่ 2-5 จน $\eta_i = \eta_f$ จะได้

$$h = 4625.69 \left(w/m^2 \cdot k \right)$$

ก.2 ตัวอย่างวิธีคำนวณเลขนัสเซลท์

$$Nu = \frac{hD_h}{k_l}$$

$$Nu = \frac{4625.69 \left(w/m^2 \cdot k \right) \times 0.000615385}{0.61513 \left(w/m \cdot k \right)}$$

$$Nu = 4.627$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาแฟกเตอร์ความเสียดทาน

วิธีการคำนวณหาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวของของไหลกระทำกับส่วนผนังท่อของของไหลสองสถานะที่อัตราการไหลของน้ำ เท่ากับ 175 LPM และอัตราการไหลของอากาศ เท่ากับ 0.6 CCM

$$\text{จากสมการ} \quad \left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_f + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{ace} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_c + \left(\frac{dP}{dz}\right)_e$$

พจน์ทางซ้ายเราสามารถอ่านค่าจากตัวแปรสัญญาณแรงดัน

ข.1 ความดันลดเนื่องจากความเร่ง

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{ace} = G^2 \left[\left(\frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{outlet} + \left(\frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{inlet} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{ace} = 233.05^2 \left[\left(\frac{0.0046^2}{1.158 \times 0.964} + \frac{(1-0.0046)^2}{(1-0.964) \times 994.65} \right)_{outlet} + \left(\frac{0.0046^2}{1.182 \times 0.964} + \frac{(1-0.0046)^2}{(1-0.964) \times 994.65} \right)_{inlet} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{ace} = 0.846634783$$

ข.2 ความดันลดที่เกิดจากการหดตัวของของไหลที่ทางออก

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_c = G^2 \left[\left(\frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{outlet} + \left(\frac{x^2}{\rho_G \alpha} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_L} \right)_{inlet} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_c = 233.05^2 \left[\left(\frac{0.0046^2}{1.158 \times 0.964} + \frac{(1-0.0046)^2}{(1-0.964) \times 994.65} \right)_{outlet} + \left(\frac{0.0046^2}{1.182 \times 0.964} + \frac{(1-0.0046)^2}{(1-0.964) \times 994.65} \right)_{inlet} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_c = 0.846634783$$

ข.3 ความดันลดที่เกิดจากการขยายตัวของของไหลที่ทางเข้า

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_e = G^2 \gamma (\gamma - 1) \left[\frac{1-x^2}{\rho_L (1-\alpha)} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_e = 233.05^2 \times 0.0318 (0.0318 - 1) \left[\frac{1 - 0.004055213^2}{997(1-0.964)} \right]$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_e = -21.3063381$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 หาแฟกเตอร์ความเสียหายที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นผิวของของไหล

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_f = f_{TP} \frac{1}{D_h} \frac{G^2}{2\rho_{TP}} = 116157.6197$$

$$f_{TP} = 0.598706$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณหาขนาดของปั้มน้ำ

ความยาวของสายยางจากปั้มน้ำไป flow meter 1.875 m จาก flow meter ไป mixing chamber 1.29 m และจาก test section ถึงถังรองน้ำ 0.5 m ขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางสายยาง 4 m มีอัตราการไหล 400 cm³ /min สมมติให้น้ำมีอุณหภูมิเท่าอุณหภูมิห้อง

ค.1 หาค่า Major loss ของสายยาง

$$\text{จาก } Re = \frac{\rho V D_H}{\mu}$$

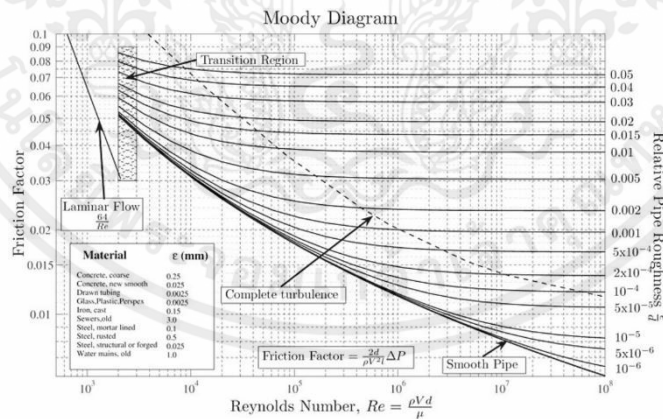
$$Re = \frac{\rho \left(\frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} \right) D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\mu \pi D} = \frac{4 \times 997 \times \left(\frac{400 \times 10^{-6}}{60} \right)}{(0.891 \times 10^{-3}) \times \pi \times 0.004} = 2374$$

และค่า ε ของสายยางเท่ากับ 0.07 mm ทำให้คำนวณค่าขรุขระสัมพัทธ์ได้

$$r = \frac{\varepsilon}{d} = \frac{0.07 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 0.0175$$

นำค่า r และ Re ไปเปิดใน Moody diagram ที่อุณหภูมิ น้ำ 25 °C เพื่อหาค่า f จะได้ค่า

$$f = 0.058$$



แทนค่าหา H_{LF} ของท่อ

$$H_{Lf} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.058 \times \left[\frac{1.875 + 1.29 + 0.5}{0.004} \times \frac{\left(\frac{400 \times 10^{-6}}{60} \right)^2}{2 \times 9.81} + 2 \times \left(\frac{0.68}{0.004} \right) \times \frac{\left(\frac{200 \times 10^{-6}}{60} \right)^2}{2 \times 9.81} \right] \approx 0.763 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.2 หาค่า Major loss ของ Test section

จากการแยกไหลของของไหลแบบขนาน

$$Q = Q_1 + Q_2 \text{ และ } h_1 = h_2$$

หาค่า f ของ test section เนื่องจากการไหลในท่อไมโครทองแดงทั้ง 25 ช่อง เป็น แบบ Laminar flow และพื้นที่หน้าตัดต่อเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง 8:5 หรือ 1.6:1 ซึ่งเราจะประมาณเพื่อ เป็น 2:1 จะได้ค่า $f = \frac{62.20}{Re}$

$$\left(\frac{400 \times 10^{-6}}{60} \right)$$

$$\text{จาก } V = \frac{25}{0.0008 \times 0.0005} = 0.67 \text{ m/s}$$

แทนค่าหา H_{Lf} ของ test section

$$H_{Lf} = f \frac{L}{D_H} \frac{V^2}{2g} = 0.103 \times \left(\frac{0.04}{0.000615} \right) \times \frac{(0.67)^2}{2 \times 9.81} \approx 0.15 \text{ m}$$

ค.3 หาค่า Minor loss ของ fittings และ accessories

- Tee, Branch flow, flange $K = 0.7 \times 2 = 1.4$
- Union, threaded $K = 0.08 \times 6 = 0.48$
- Expansion $K = 1$ (180°)
- Contraction $K = 0.5$ (180°)

รวมค่า K ทั้งหมด $1.4+0.48+1+0.5 = 3.38 \approx 3.4$

$$\text{แทนค่า } H_{Le} = K \frac{V^2}{2g} = 3.4 \times \frac{\left(\frac{400 \times 10^{-6}}{60} \right)^2}{\frac{\pi}{4} \times 0.004^2} = 0.04879 \text{ m} \approx 0.049 \text{ m}$$

ค.4 การคำนวณหาค่ากำลังปั๊มน้ำหาค่า Head loss

$$H_L = \text{Major loss} + \text{Minor loss} = H_{Lf} + H_{Le}$$

$$H_L = (0.763 + 0.15) + 0.049 = 0.962 \text{ m}$$

ค.5 หา Input power ของปั๊มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้มีการสูงขึ้น 0.5 เมตรและประสิทธิภาพเท่ากับ 50%

$$\text{input power} = \frac{\rho g Q (H_L + (z_2 - z_1))}{\eta} = \frac{997 \times 9.81 \times \frac{400 \times 10^{-6}}{60} \times (0.962 + 0.5)}{0.5} = 0.19 \text{ Watt}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้